Roger Ernoul

Le grand livre de la qualité

Management par la qualité dans l'industrie, une affaire de méthodes

afnor
ÉDITIONS

Le grand livre de la qualité

Roger Ernoul

Préface de Hervé Serieyx

Le grand livre de la qualité

Management par la qualité dans l'industrie, une affaire de méthodes



L’auteur

Roger ERNOUL, Ingénieur Supélec, est aujourd’hui consultant dans le domaine du management de la qualité (conseil et formation). Auparavant, il exerçait des fonctions de responsabilité et de direction chez Philips (production, conception, achats, planification stratégique, logistique, qualité). Il est l’auteur de nombreux articles très appréciés parus soit au sein des ouvrages à feuillets mobiles AFNOR, soit au sein des sites « métier » AFNOR.

ISBN 978-2-12-465232-7



AFNOR – 11, rue Francis de Pressensé,
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél. : + 33 (0) 1 41 62 80 00 – www.afnor.org

Sommaire

Partie III – Les techniques générales

Partie IV – L'amélioration des produits et ses méthodes et techniques

Un hommage et quelques souvenirs

Il me tient à cœur d'évoquer ici la mémoire de Jacques Chové qui m'a fait découvrir ce monde passionnant de la qualité. Ma perception de la qualité a été forgée au cours de nombreuses discussions ou réflexions que nous avions eues ensemble. Il a été une personnalité du monde de la qualité sur le plan national mais également international. Il est décédé prématurément et d'une façon tout à fait inattendue en 1992. Les plus anciens gardent certainement un souvenir aigu de cette forte personnalité. Jacques Chové a été directeur de la qualité de Philips France, qu'il a quitté pour devenir ingénieur-conseil. Que cela soit dans le cadre de Philips ou de ses activités de conseil, il a apporté sa contribution auprès des plus hautes instances concernées par l'évolution de la qualité en France, telles que le Groupe AFNOR, l'AFAQ, le RNE (devenu COFRAC), le ministère de l'industrie, etc.

J'avais eu la chance de travailler avec lui plusieurs années dans le domaine de la qualité après avoir passé trois années comme ingénieur de production dans le groupe « composants électroniques » de la Radiotechnique, filiale de Philips. Ce qui m'avait particulièrement intéressé chez lui est qu'il avait une vision de la qualité qui mettait l'homme au centre des démarches qualité. Cette vision l'avait conduit à un rapprochement avec une autre forte personnalité de la Radiotechnique, Geneviève Rabaut, qui dirigeait le service de « psychologie ». C'était l'occasion de nombreuses et riches discussions et réflexions sur les aspects psychologiques de la qualité. Cela a été pour moi l'opportunité de

faire la connaissance d'une jeune et brillante psychologue qui a marqué mon existence puisque très vite nous nous sommes mariés !

Après une assez longue période dans le monde de la qualité, j'ai eu de nombreuses autres fonctions de management s'ajoutant à mon premier métier d'ingénieur de production (achats/approvisionnements, organisation, conception, logistique et planification stratégique, adjoint du directeur d'une division internationale, etc.) dans différents secteurs du groupe Philips. En 1991, j'ai quitté ce groupe et j'ai retrouvé Jacques Chové pour travailler en coopération avec lui en conseil et formation dans le domaine du management de la qualité.

Préface

C'est un refrain connu mais qui n'a rien perdu de son actualité : « La qualité, ce n'est pas une destination, c'est un voyage » ; une phrase qui mérite commentaires tant elle est riche. « Ce n'est pas une destination » : comme la qualité concerne tous les porteurs d'enjeux de l'entreprise – ses clients, ses actionnaires, ses dirigeants, ses salariés, ses fournisseurs, ses riverains, le marché de l'emploi et le développement de son territoire – et que de permanents bouleversements économiques, technologiques et sociétaux font sans cesse évoluer les attentes, les contraintes et les exigences de ces différents acteurs, on perçoit bien que la qualité ne peut comporter de gare Terminus à laquelle on pourrait se dire : « ça y est, nous sommes arrivés, nous avons obtenu le niveau de qualité maximum, tout le monde descend ! ».

« C'est un voyage » : comme tout voyage, celui-ci a une histoire. Pour sa conception actuelle de la qualité industrielle, ce voyage a commencé dans les années 1950-1960, aux États-Unis, en France, au Japon, il a fortement accéléré dans les années 1970-1980 pour trouver sa vitesse de croisière dans les années 1990 et visiter de nouveaux continents – les services, le monde associatif, les administrations, les collectivités territoriales – au début du nouveau millénaire. Comme tout voyage, il a ses passagers de marque, ses grands noms tels que Juran, Deming, Ishikawa, bien d'autres, et en France Jacques Chové. Comme tout long voyage, il a dû se doter, chemin faisant, des outils de son pilotage – de la boussole au GPS – pour assurer sa route : des techniques, des méthodes, des concepts – l'assurance qualité, le management par la qualité, la gestion par processus, la qualité totale, des normes…

Comme tout voyage aussi, il a entraîné dans son cours des voyageurs fort différents : des fans pour qui tout est qualité, des sceptiques qui trouvent tout cela bien compliqué, des partisans qui ne voient chacun que l'aspect de la qualité qui leur convient – celui-ci le management de la qualité, celui-là les systèmes de gestion, cet autre les outils et les techniques –, des snobs qui ne s'intéressent qu'aux modes : « La qualité totale, mais c'est dépassé ! ».

Comme tout voyage sans fin, il conduit vers des continents nouveaux, le « Risk management » dont la crise financière a montré l'importance majeure, l'impérieuse nécessité des innovations de rupture, la Responsabilité Environnementale et Sociale de l'entreprise, le développement durable…

Depuis 1980, en particulier, les entreprises industrielles françaises, embarquées dans ce beau voyage, ont connu de superbes avancées et une transformation profonde de leur culture. Mais aujourd'hui la conjonction de la force de l'habitude et de la tyrannie du court terme risque parfois de les amener à privilégier la forme, ce qui se voit, aux dépens du fond, et par exemple, l'obtention de la certification aux dépens de l'esprit même de la qualité et de la maîtrise de ses techniques et de ses méthodes.

En écrivant *Le grand livre de la qualité*, Roger Ernoul a voulu nous rappeler à la vigilance. En évoquant l'histoire et la trajectoire du « voyage » de la qualité, il en souligne les principaux, et, pour l'avenir, leurs immenses potentialités, Mais surtout, il met en évidence combien sont indissociables le management des personnes par la qualité, les systèmes de gestion de la qualité et les techniques et méthodes mises au point pour analyser les situations et piloter les progrès de la qualité.

Roger Ernoul est sans doute un des Français les plus qualifiés pour dessiner ce vaste panorama de la qualité : son cursus, son expertise, sa longue pratique de la qualité dans l'entreprise et le conseil, sa proximité avec l'un de ceux qui aura été l'un des plus importants contributeurs de l'univers de la qualité, Jacques Chové ; tout cela le qualifiait incontestablement pour la rédaction de ce « grand livre ».

Nul doute que cet ouvrage très complet, à la fois techniquement rigoureux et vulgarisateur, ne donne un nouveau souffle au développement de la qualité dans notre pays : tel spécialiste y découvrira ou y retrouvera le goût de pratiquer des outils et des méthodes aux remarquables propriétés ; tel dirigeant y puisera des approches neuves pour redonner du tonus au management de son entreprise, tel autre appréciera combien les démarches de la qualité peuvent se révéler

efficaces dans d'autres champs que la seule industrie et dans d'autres domaines que ceux de la production et de la relation client-fournisseur.

Décidément, le livre de Roger Ernoul est bien un « grand livre » : dans cette période troublée de forts bouleversements où la vraie question pour tous ceux qui sont des acteurs engagés dans la société, c'est la question du sens, ce livre apporte une réponse, celle de la qualité, une qualité qui devra être, de plus en plus, au cœur de la plupart des activités humaines. Alors, souhaitons, pour notre bien commun, que ce livre rencontre le plus grand lectorat possible : il le mérite.

Hervé Sérieyx

Introduction

Pourquoi ce livre ?

Pourquoi ce livre et pourquoi avoir choisi ce thème des méthodes qualité ? Le rapide historique suivant sur l'évolution de la qualité m'a convaincu que les méthodes et techniques de la qualité étaient devenues le parent pauvre de la qualité et méritaient d'être remises en valeur. Ayant acquis une certaine expérience de terrain dans ce domaine, j'ai pensé qu'il pourrait être utile d'en faire profiter d'autres personnes, et notamment vous, lecteur !

Rapide historique

Les années 50-60 et les méthodes et techniques

Ces périodes ont été marquées par un fort développement des méthodes et techniques de la qualité qui ont été d'un apport considérable dans l'amélioration de la qualité dans l'industrie. La plupart de celles-ci nous viennent des États-Unis et souvent du monde des armées avec comme support les normes MIL. Citons les grands axes suivants.

- **La fiabilité des produits**

C'est l'époque où ont été élaborées les théories de la fiabilité et ses techniques. Cette période a été celle du développement des tests environnementaux

notamment mécaniques et climatiques qui ont été déterminants dans l'amélioration de la fiabilité. Les services qualité s'équipaient en matériel de test et lançaient des programmes de test d'endurance sur leurs produits. En France, le rôle du CNET (Centre national d'études en télécommunications) ainsi que celui des organismes de normalisation a été majeur dans ce domaine de la fiabilité. C'est à cette époque que le CNET a lancé le recueil de fiabilité au niveau français, en s'inspirant du recueil américain Mil Hand Book 217. On ne met pas suffisamment en valeur l'amélioration de la fiabilité des produits dans cette période, notamment dans des domaines tels que le spatial, le nucléaire, l'aéronautique, l'électronique, etc.

● **Les techniques de contrôle**

Déjà, dans les années 40, avaient été développées les tables d'échantillonnage MIL Standard 105 qui sont remarquables et ont apporté beaucoup dans les relations clients-fournisseurs..

● **Les méthodes qualité**

C'est au cours de cette période qu'ont été développées par les États-Unis la plupart des méthodes (parfois même bien avant). Mais la France – ou plus généralement l'Europe – a également été active dans ces domaines.

Citons :

- les plans d'expériences ;
- l'AMDEC (Analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité) ;
- l'Analyse de la valeur et l'Analyse fonctionnelle ;
- la Maîtrise statistique des procédés (*Statistical Process Control* souvent mieux connu par son sigle : SPC) ;
- les techniques de traitements statistiques. La France a été très en pointe dans ce domaine avec de grands statisticiens comme Darmois, Vessereau, Cavé… qui ont su introduire les techniques statistiques dans les entreprises industrielles. C'est à cette époque qu'a été créé le CERESTA (Centre d'enseignement et de recherche de statistique appliquée) avec la diffusion de la revue de *Statistique appliquée*, ceci dans le cadre de l'Institut de Statistique de l'Université de Paris.

Il est de bon ton de dire que les démarches qualité étaient, à cette époque, essentiellement orientées vers le bon fonctionnement de l'entreprise au détriment

de la prise en compte de la satisfaction du client. De notre point de vue, c'est excessif dans le monde industriel. Juran, un expert de la qualité de renommée internationale, avait largement diffusé ce message de l'importance de la satisfaction du client. Par ailleurs, l'importance de la spécification du produit censée traduire le besoin du client était devenue une idée clé. C'est au cours de cette période que se développent L'Analyse de la Valeur et l'Analyse Fonctionnelle qui vont dans le sens de la prise en compte de la satisfaction des besoins du client et des utilisateurs des produits.

Cette période a été marquée par les idées de Juran et Deming, deux personnages importants dans le développement de la qualité : le second, bien connu pour sa roue dite « PDCA : *Plan Do CheckAct* » dont nous dirons un mot ultérieurement avait parfaitement intégré les méthodes statistiques au cœur du management de la qualité. Ils avaient été engagés par le gouvernement japonais pour enseigner la qualité dans un contexte national avec le succès que l'on connaît.

● La normalisation

Les normes se sont également beaucoup développées en France pour aider les entreprises dans leur gestion de la qualité. Un grand nombre d'entre elles ont été réalisées sur des thèmes importants pour la qualité tels que : la métrologie, le contrôle, les produits, les labels, l'assurance de la qualité, les méthodes…

Les années 70 et la qualité totale

Si nous considérons que la non prise en compte des besoins du client n'était pas une lacune majeure des années 50-60, par contre nous pensons que les deux points faibles étaient les suivants.

● L'absence de la qualité dans la stratégie des entreprises

Le management était relativement conscient de l'importance de la qualité mais n'avait pas réellement perçu à quel point elle aurait dû être au cœur de la stratégie de l'entreprise. La qualité semblait aller de soi mais on n'en faisait pas un véritable outil de conquête des marchés.

● Le manque d'implication et d'engagement du management

Les directions mettaient éventuellement en place des services qualité conséquents et bien formés ; elles leur donnaient une large délégation pour gérer la qualité ; mais elles n'avaient pas réalisé qu'il est très difficile aux personnes sur le terrain de développer les démarches qualité sans leur soutien direct.

Cette décennie a été une grande période de travaux, d'études et d'expériences dans le domaine du management en général et du management de la qualité en particulier. Il y aurait trop de personnes à citer. Par moments nous regrettons que le management actuel les ait un peu oubliées. Nous nous limitons à citer trois ouvrages d'Hervé Sérieyx : *L'entreprise du 3e type*[1], le *Zéro mépris* et, plus récemment, *La nouvelle excellence*.

Cette période a donc été un terrain favorable à l'introduction de la « qualité totale » qui a mis en valeur le rôle du management dans les démarches qualité et l'intérêt d'une forte implication du personnel.

Cela a été également la période du développement des « cercles de qualité » qui partaient du principe que le personnel sur le terrain était le mieux placé pour résoudre les problèmes auxquels il était confronté. Si ces cercles sont passés de mode après avoir pris une ampleur considérable, ils ont laissé des acquis fondamentaux :

– Il est important de faire participer le plus possible l'ensemble du personnel à la gestion de la qualité.
– Le travail en groupe est d'une grande utilité mais à condition que le groupe travaille avec une méthodologie rigoureuse et structurée, sinon le risque est grand de tourner à la palabre et à l'absence d'efficacité. Cela a été un apport important des Japonais.

D'une façon plus générale, de notre point de vue, l'apport des Japonais a été de transformer chaque bon principe en une méthode structurée. Cela a peut-être secoué nos traditions françaises parfois marquées par un manque de formalisme et un certain sens de l'improvisation. Pour notre part, ayant travaillé dans le groupe hollandais Philips, ce point nous apparaissait d'autant plus clairement que la culture hollandaise nous poussait vers une approche plus méthodique dans nos façons de faire.

Les années 80, 90, 2000 et l'assurance de la qualité

Ces années ont été celle du développement de l'assurance de la qualité qui met l'accent sur les aspects organisationnels de la qualité. Une idée de base est que l'on peut faire beaucoup de bonnes choses en matière de qualité mais si les efforts sont dispersés en dehors d'une organisation bien formalisée, cela n'est pas efficace. Il faut une organisation et un management.

---

1. Coécrit avec Archier.

Les principes de l'assurance de la qualité étaient déjà bien connus dès les années 40. Les Américains avaient mis au point les normes MIL relatives à ce domaine. Puis il y eut les normes de l'OTAN, les AQAP (*Allied Quality Assurance Program*) qui ont donné naissance aux normes ISO 9000 en 1987[2].

Ceux qui n'ont pas connu cette période ne peuvent imaginer la dispersion des efforts que cela représentait pour les entreprises qui devaient parfois respecter plusieurs dizaines de systèmes d'assurance de la qualité car chaque grande entreprise imposait le sien.

La mise en place d'un système d'assurance de la qualité a pris dans les entreprises une ampleur extrêmement forte, d'autant plus que la certification devenait nécessaire pour conquérir des marchés. La version 2000 puis 2008 a certainement apporté des améliorations importantes telles que :

– L'approche processus qui met encore mieux en valeur la satisfaction des clients.
– L'importance moins grande attachée, en contrepartie, aux procédures. Il y avait eu beaucoup d'excès dans ce domaine, donnant parfois de la qualité l'image d'une affaire contraignante et paperassière. Nous craignons parfois que, si l'assurance de la qualité s'était beaucoup discréditée par cet excès, le risque existe également actuellement pour les processus qui sont parfois trop nombreux à notre point de vue.
– L'accent mis sur le processus d'amélioration.

Ce passage de l'« assurance de la qualité » au « management de la qualité » a été un pas important vers la qualité totale.

La période actuelle et conclusions

Nous sommes actuellement toujours confrontés au poids considérable pris par le management de la qualité avec ses aspects organisationnels. De plus, et à juste titre, s'ajoutent la prise en compte des problèmes d'environnement, avec la norme ISO 14001, et les problèmes de sécurité, avec le référentiel OHSAS 18001 par exemple. Tout cela laisse peu de place au développement des méthodes et techniques, au point que la fonction qualité en néglige la promotion alors qu'elles sont pourtant souvent, comme on le verra, une réponse pour la satisfaction des exigences de ces normes ou référentiels. Bien sûr, il n'est pas question de demander aux personnels des services qualité

2. La version 1994 a apporté quelques modifications non fondamentales.

d'être eux-mêmes des experts dans tous ces domaines mais bien d'être en mesure d'en assurer la promotion.

En résumé, il nous semble que le management de la qualité doit trouver un équilibre entre les trois grands axes :

– le management ;
– l'organisation et la gestion ;
– l'utilisation des méthodes et techniques.

Nous pensons qu'il y a actuellement un déséquilibre au détriment des méthodes et techniques, qui mérite d'être corrigé. Et c'est le sens de ce livre d'aider à leur promotion.

Celui-ci présente bon nombre de méthodes que nous avons appliquées dans leur quasi totalité. Nous y associons quelques réflexions théoriques, fruit de notre expérience Nous avons essayé de présenter les méthodes de la façon la plus simple possible, allant parfois jusqu'à une certaine vulgarisation. Nous sommes persuadés être allé à un niveau de détails suffisant pour permettre leur mise en œuvre, sachant qu'il existe, pour chacune, des ouvrages spécialisés pour approfondir l'application.

Partie I

Le management de la Qualité

1

La qualité totale ou le management total de la qualité

1.1 Concepts et définitions

1.1.1 Le contexte

Notre premier sujet concernera quelques méthodes relatives au management de la qualité. Nous examinerons d'abord l'aspect structurel avec la « mise en place des processus » puis la mise en œuvre d'un « plan d'amélioration de la qualité ».

Notre vision de la qualité étant orientée dans le sens de la « qualité totale », nous préférons les présenter dans ce contexte. Mais il nous faut clarifier ce point. La qualité totale est un concept qui s'est traduit par beaucoup de variantes dans lesquelles on se perd un peu.

Citons :

- le CWQI (*Company Wide Quality Improvement*);
- la TQM (*Total Quality Management* : Gestion globale de la qualité) ;

– la méthode 6 Sigma de Motorola mettant en valeur le traitement statistique des données ;
– le Kaizen mis en œuvre par les Japonais ;
– l'EFQM (*European Foundation for Quality Management*). Il s'agit d'une démarche d'auto-évaluation et l'EFQM attribut un prix ;
– etc.

Aussi notre objectif n'est pas d'en faire une analyse comparative mais bien de dire de quoi nous parlons. D'abord l'expression « Qualité totale » ou « Management total de la qualité » ne nous satisfait pas beaucoup par leur caractère un peu excessif. Mais nous n'allons pas compliquer la situation en inventant une autre expression.

1.1.2 Notre vision de la qualité totale

Or ce sont bien les idées qui sont au cœur du concept de la Qualité totale qui ont notre faveur. Mais d'abord, il nous faut nous mettre d'accord sur une définition et les concepts associés.

1.1.3 La définition de la « qualité totale » ou « du management total de la qualité »

Nous retenons la définition du « Management total de la qualité » qui avait été proposée par Jacques Chové et qui a été retenue par l'AFNOR :

« Mode de management d'un organisme, centré sur la qualité, basé sur la participation de tous ses membres et visant au succès à long terme par la satisfaction du client et à des avantages pour les membres de l'organisme et pour la société. »

« La Qualité Totale, pour une entreprise, est une politique qui tend à la mobilisation permanente de tous ses membres pour améliorer :

– la qualité de ses produits et services ;
– la qualité de son fonctionnement ;
– la qualité de ses objectifs,

en relation avec l'évolution de son environnement. »

Il nous semble que tout est dit : il apparaît clairement que l'on est dans une logique **d'amélioration permanente** et qu'elle concerne **l'ensemble des services** ou processus de l'entreprise **même s'ils ne sont pas directement concernés par**

le produit. Cela va donc nettement au-delà de l'ISO 9001:2008. Il est clair que l'ISO 9001, dans son contexte de certification, ne peut pas englober la totalité du domaine couvert par la qualité totale. Ce n'est donc pas une critique à son égard. Il n'y a de plus nulle opposition avec la norme ISO 9001 à laquelle nous ferons de fréquentes références tout le long de ce livre. Le guide que représente l'ISO 9004 est un pas en avant vers la qualité totale telle que nous l'entendons.

1.1.4 Les concepts

Bien sûr, on se réfère au PDCA qui est un guide pour toute démarche de qualité :

- *Plan* : Préparer, planifier.
- *Do* : Développer, réaliser, mettre en œuvre.
- *Check* : Contrôler, vérifier.
- *Act* (ou *Adjust*) : Agir, ajuster, réagir.

Sans en contester le bien fondé il nous apparaît un problème lié à la terminologie anglaise. Le terme *Plan,* traduit d'une façon littérale en français, ne met pas assez l'accent sur la détermination des **objectifs** au cours de cette phase. S'agissant du produit, « *to plan* » doit inclure la rédaction des **spécifications** et la détermination des objectifs en termes de planning, coûts, budget, etc. De même le terme *Act* ne met peut-être pas assez en évidence **l'amélioration** qu'il faut instaurer au terme de la boucle.

Nous nous limitons à passer en revue très rapidement les concepts inhérents au management de la qualité totale :

- la conformité aux besoins du client ;
- l'amélioration permanente ;
- la valorisation du personnel ;
- la reconnaissance des mérites ;
- la mesure ;
- la prévention.

Examinons plus particulièrement trois de ces points :

Valoriser le personnel c'est s'appuyer sur lui en considérant qu'il constitue une richesse de l'entreprise ; c'est prendre en compte toutes ses potentialités pour faire vivre et évoluer l'entreprise. Pour cela il faut l'impliquer dans toutes

les actions et décisions concernant son domaine d'activité et lui donner plus de responsabilité et d'autonomie. Le graphique suivant (*Figure 1.1*), proposé par le professeur Shiba, montre comment l'évolution de l'organisation du travail va dans le sens d'une plus grande implication de tous dans le processus d'amélioration. Celui-ci disait que, dans le contexte de la qualité totale, toute personne embauchée dans l'entreprise devrait avoir au moins implicitement deux tâches : celle liée à son métier et celle d'amélioration de son activité. La Figure 1.1 illustre bien ce point. Par ailleurs, la plupart des méthodes présentées dans ce livre nécessitent d'être pratiquées en groupe.

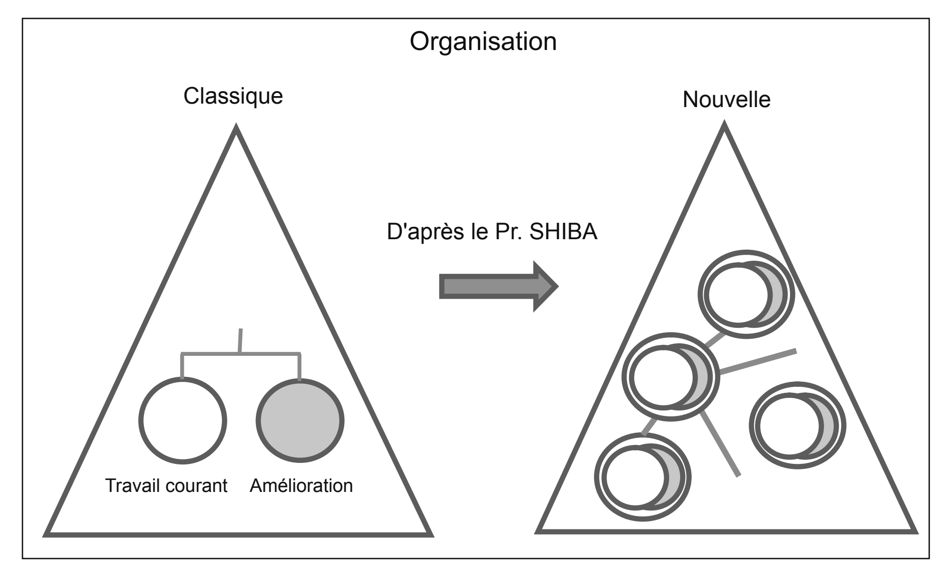


Figure 1.1 L'évolution du travail dans un contexte de qualité totale

Concernant la **reconnaissance des mérites**, le rôle du management est essentiel. Dans la mesure où l'on implique le personnel dans un processus d'amélioration permanente, la meilleure façon de reconnaître les mérites est tout simplement de manifester son intérêt, sa satisfaction voire son insatisfaction devant le travail fait par les différents acteurs et principalement ceux des groupes de travail lancés dans le cadre du processus d'amélioration permanente. Le principe de donner l'opportunité à un groupe de travail de présenter les résultats de ses travaux devant le management est essentiel de ce point de vue. Cela peut être complété par des primes ou d'autres types de récompense, mais à condition qu'elles soient collectives, au niveau d'un groupe de travail, d'un secteur de l'entreprise ou de toute l'entreprise.

L'amélioration permanente nécessite une organisation. C'est sur ce point majeur que nous allons proposer quelques méthodes.

Ayant rappelé les principes il est nécessaire de passer à l'application. Il nous faut :

– déterminer les processus ;
– écrire les procédures ;
– faire vivre le plan d'amélioration permanente.

1.2 Détermination des processus

1.2.1 Rappel de définitions

Nous rappelons quelques définitions de base :

> **Processus** : « Ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie. »
>
> **Norme ISO 9000:2008**

Et on distingue trois catégories de processus :

– de direction,
– de réalisation,
– ou de support.

> **Activité** : Partie d'un processus qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie.
>
> NOTE : Activité et processus ont donc les mêmes propriétés. On peut écrire : activité = sous-processus
>
> **Norme ISO 9000:2008**
>
> **Procédure** : manière spécifiée d'effectuer une activité ou un processus.

1.2.2 Macroprocessus de l'entreprise : Cartographie

La première chose à déterminer est le processus d'ensemble de l'entreprise que l'on peut qualifier de « macroprocessus ». Si la norme ISO 9001 ne préconise

pas particulièrement l'usage de la cartographie, celle-ci nous paraît un excellent moyen de visualisation. Nous proposons un exemple de macroprocessus assez classique (*Voir Figure 1.2*).

1.2.3 Méthode de cartographie d'un processus (*voir processus achats et processus conception*)

Ensuite il est utile de faire une cartographie des principaux processus. Nous proposons deux exemples, l'un pour le processus conception et l'autre pour le processus achats, qui sont représentés dans les deux chapitres correspondants. Nous allons ici seulement proposer la méthode pour réaliser une telle cartographie :

1. Définir les principaux services ou entités concernés, en affectant une colonne pour chacun.
2. Placer les différentes activités dans les colonnes, sous forme de rectangle, avec indication de l'activité.
3. Relier les activités par un trait représentatif de la relation entre activités ; chaque trait contient un flux de données et un sens de circulation des données. Ne représenter que les données principales sinon la cartographie risque de ressembler à une toile d'araignée.
4. Préciser de point de départ et d'arrivée du processus par un rectangle dans la colonne client (interne ou externe).

1.2.4 Description des activités

Il nous faut maintenant décrire les activités (*Voir Figure 1.2*). Cela comprend pour chaque activité :

- les données d'entrée et leurs provenances ;
- les données de sortie et leurs destinations ;
- sa description ;
- les outils éventuels tels que documents, formulaires, techniques qualité, etc. ;
- les procédures sachant qu'une procédure peut être relative à plusieurs activités ou même plusieurs processus ;
- les enregistrements relatifs à la qualité (ERQ) selon l'exigence de la norme ISO 9001:2008.

1.2.5 Exemples de processus

Nous avons fait le choix de mettre l'accent sur trois processus importants : conception, achats, production. Nous leur dédions à chacun un chapitre (*voir les chapitres 3, 4 et 5*). Sans pour autant négliger les autres, ce sont les processus qui impliquent le plus de méthodes et techniques spécifiques.

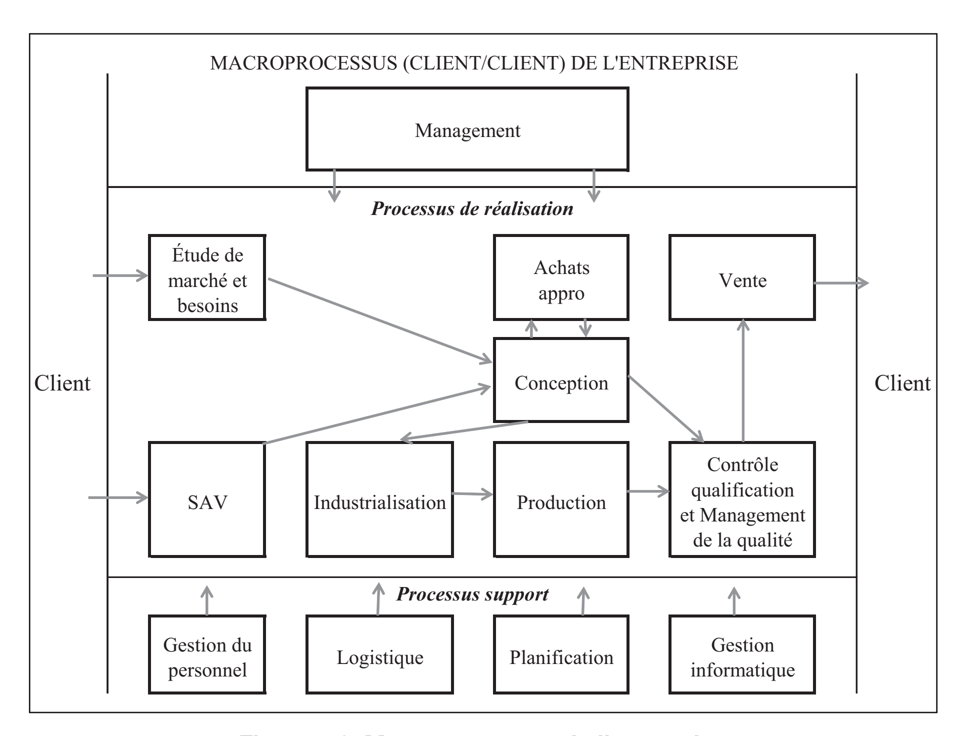


Figure 1.2 Macroprocessus de l'entreprise

1.3 Guide de rédaction des procédures

1.3.1 Principes

La rédaction des procédures repose sur les principes suivants :

- Écrire en pensant à celui à qui est destiné le document.
- Établir les documents et les mettre en œuvre en groupe en impliquant les personnes concernées.

– Simplifier la rédaction au maximum, éviter les grandes phrases :
  - une seule idée dans une phrase ;
  - un seul sujet dans un paragraphe ;
  - un seul objectif dans un document ;
  - ne pas écrire les évidences ou les pratiques bien établies, ne pas écrire ce qui relève du savoir faire.
– Utiliser graphiques, tableaux, logigrammes, etc.
– S'inspirer du « **Quoi, Qui, Quand, Comment** » qui est la présentation ayant notre préférence.

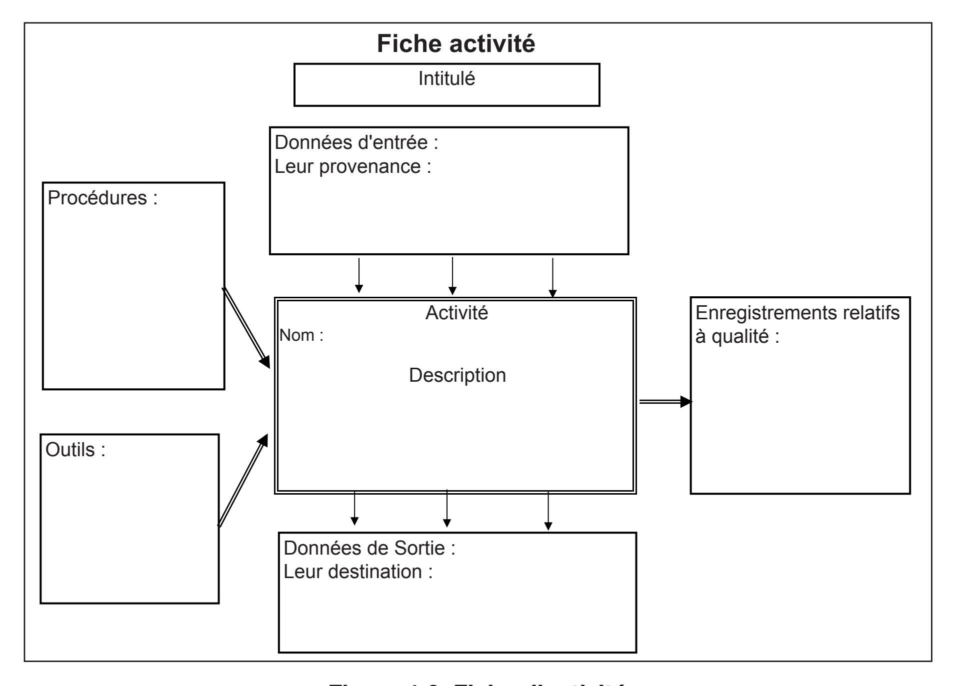


Figure 1.3 Fiche d'activité

1.3.2 Présentation d'une procédure selon la méthode du « Quoi Qui Quand Comment »

La présentation en colonne indiquant « Quoi, Qui, Quand, Comment » est très adaptée à la création d'une procédure en **groupe de travail** :

– **Quoi** : l'action à mener ; le travail à effectuer (nous dirons la tâche).

- **Qui** : le responsable de la tâche.
- **Quand** : dans quel délai ou à quelle fréquence, éventuellement l'enchaînement avec les autres actions.
- **Comment** : avec quels moyens ? Par exemple : matériel nécessaire, référence à un mode opératoire, fiche, formulaire à utiliser, etc.

Dans l'exemple proposé (*Tableau 1.1*), une colonne ERQ a été ajoutée pour identifier les « Enregistrements Relatifs à la Qualité ».

Cette présentation des procédures a notre préférence car elle permet de faire facilement une procédure en groupe de travail. Cependant la présentation en logigramme présente un intérêt certain ; aussi nous préférons ne l'utiliser que comme page de synthèse pour résumer la procédure si nécessaire. Ce logigramme peut être réalisé après la réunion du groupe par le rédacteur. Il nous paraît difficile d'effectuer un logigramme directement en groupe de travail. Nous allons présenter l'exemple d'une procédure de « gestion des appels d'offres » dans le cadre d'un processus achats, réalisée avec la méthode du « Quoi, Qui, Quand, Comment ». Cette procédure est décrite dans le tableau suivant.

1.4 Grille de comparaison du processus et de la procédure

La notion de processus est indéniablement un progrès des normes de la série des ISO 9000 version 2008. Mais force est de constater que l'on assiste encore trop souvent à une confusion entre « processus » et « procédure ».

Si les définitions sont sans ambiguïté, des confusions subsistent. Le processus indique ce que l'on fait, la procédure comment le faire.

Le tableau suivant (*Voir Tableau 1.2*) présente quelques critères aidant à éviter la confusion.

1.5 Plan d'amélioration de la qualité (PAQ)

1.5.1 L'engagement du management

Il est indispensable que son management soit assuré par la Direction. En effet, le PAQ exige une forte implication du personnel que l'on ne peut imaginer sans un engagement fort du management. De plus, il va entraîner le lancement de

Tableau 1.1 Exemple de procédure

Procédure n° :	Responsable :	Accord : (Nom de la personne ayant donné son accord)	Diffusion : (Liste de diffusion)	Modification : (dates)
Objectif : Gérer les appels d'offres				
Champ d'application : lorsqu'un produit a un caractère stratégique un appel d'offres doit être lancé. Le caractère stratégique est déterminé en accord entre le « prescripteur » et la direction des achats.				
Quoi	Quand	Qui	Comment	ERQ
Écrire le projet de contrat	Délai d'une semaine à partir de la décision de lancer l'appel d'offres	L'acheteur	Selon méthode d'établissement des contrats Ach xxx	
Choisir les fournisseurs à consulter	Au cours de la 1re semaine	L'acheteur	Après consultation du prescripteur et du service la qualité	
Enregistrer l'appel d'offres	Immédiat	Secrétariat achat	Dans « Cahier des appels d'offres »	Oui
Envoyer l'appel d'offres	Délai 3 jours	Secrétariat achat	Courrier avec AR Copie à toutes les personnes concernées : prescripteur, logistique, qualité, finances…	
Réceptionner les réponses	Dans le délai spécifié dans l'appel d'offres	Secrétariat achat		
Exploiter les réponses	Délai : 3 jours	L'acheteur avec le prescripteur	Selon méthode Ach yyy	

Tableau 1.1 Exemple de procédure (fin)

Quoi	Quand	Qui	Comment	ERQ
Finaliser le contrat	2 jours	L'acheteur avec le prescripteur et la qualité		Oui
Si le choix ne s'impose pas : analyse plus approfondie des réponses	Délai 1 semaine	L'acheteur avec le prescripteur et la qualité La participation d'autres personnes concernées peut être envisagée	Si possible au cours de visites et éventuellement audit qualité. Comptes rendus impératifs.	Oui
Choisir le fournisseur et établir un contact pour négocier	Délai 1 semaine	L'acheteur avec le prescripteur et la qualité	La participation d'autres personnes concernées peut être envisagée.	
Finaliser le contrat	2 jours	L'acheteur avec le prescripteur et la qualité		Oui
Envoyer le contrat	Dès la prise de décision	L'acheteur Au fournisseur	Copie à prescripteur et qualité	

Tableau 1.2 Comparaison processus/procédure

Éléments de comparaison	Processus	Procédure
Objectif	Fournir un cadre adapté au management de la qualité Cela peut impliquer : détermination de responsabilités, plans d'amélioration, suivi d'indicateurs, prévention des risques…	Indiquer comment réaliser les tâches inhérentes aux activités
Contenu	Ensemble d'activités	Ensemble de tâches[1]
Taille	Une « activité » recouvre un volume important de travail Exemple : « Gestion des appels ».	Une tâche peut représenter un volume de travail très réduit Exemple : « envoyer réponses par mail »
Libellé	Un substantif[2] Exemple : Conception	Un verbe à l'infinitif + un complément pour indiquer une action Exemple : Enregistrer les données
Aspect temporel	Pas nécessairement chronologique Mais peut décrire un flux[3]	Prend en compte la chronologie des tâches à effectuer
Rôles décrits	Les responsabilités	Les acteurs
Moyens	Fait référence aux ressources	Fait référence à des moyens, des documents, des formulaires…

1. Le mot tâche n'a pas de définition officielle au sens de l'ISO 9000.
2. Certains préfèrent mettre un verbe, nous ne considérons pas que cela soit une erreur, mais employer un substantif nous semble un moyen d'éviter la confusion et a notre préférence.
3. La représentation systématique des processus par logigramme ne nous paraît pas adaptée. De notre point de vue, leur utilisation pour un processus est souvent un signe de confusion entre processus et procédure.

nombreuses actions ou projets qui peuvent nécessiter des investissements et il faudra assurer la cohérence de l'ensemble de ces actions en relation avec la politique et les objectifs de l'entreprise. Par ailleurs, la « reconnaissance » de ces actions ou projets par le management est, rappelons-le, un élément fondamental de motivation.

1.5.2 La politique de l'entreprise

Le point de départ indispensable est que le management ait bien défini :

– sa politique ;
– les objectifs annuels qui en découlent ;
– les indicateurs associés aux objectifs

comme cela est exigé par ailleurs dans la norme ISO 9001.

On peut ajouter

– sa stratégie ;
– ses valeurs.

Ce dernier point nous paraît intéressant mais à condition que le management montre en permanence son engagement sur ces valeurs.

La politique doit être en accord avec l'environnement extérieur : les lois et règlements, les aspects environnementaux, sociaux et culturels.

Revenons sur la politique et les objectifs. Il y a parfois des confusions entre les deux idées. La politique doit être définie en termes généraux, sans toutefois rester au niveau des généralités.

Par exemple : « Améliorer la satisfaction des clients par une meilleure fiabilité de nos produits » est bien préférable à « Améliorer la satisfaction des clients » qui est une évidence.

En revanche, un objectif se distingue d'un axe politique par le fait qu'il est tourné vers l'action et n'a de sens que si l'on peut lui associer un indicateur, une mesure.

Par exemple : « diminuer le taux de retours ».

1.5.3 La sensibilisation et la formation

Avant d'entreprendre un plan d'amélioration de la qualité, il est indispensable d'informer, sensibiliser et former le personnel en conséquence.

1.5.4 L'organisation et le management du PAQ

Il est essentiel d'avoir une organisation permettant de piloter le Plan d'amélioration de la qualité (PAQ).

La méthode de mise en œuvre que nous proposons a été mise au point en collaboration avec Jacques Chové dont j'ai parlé précédemment.[4]

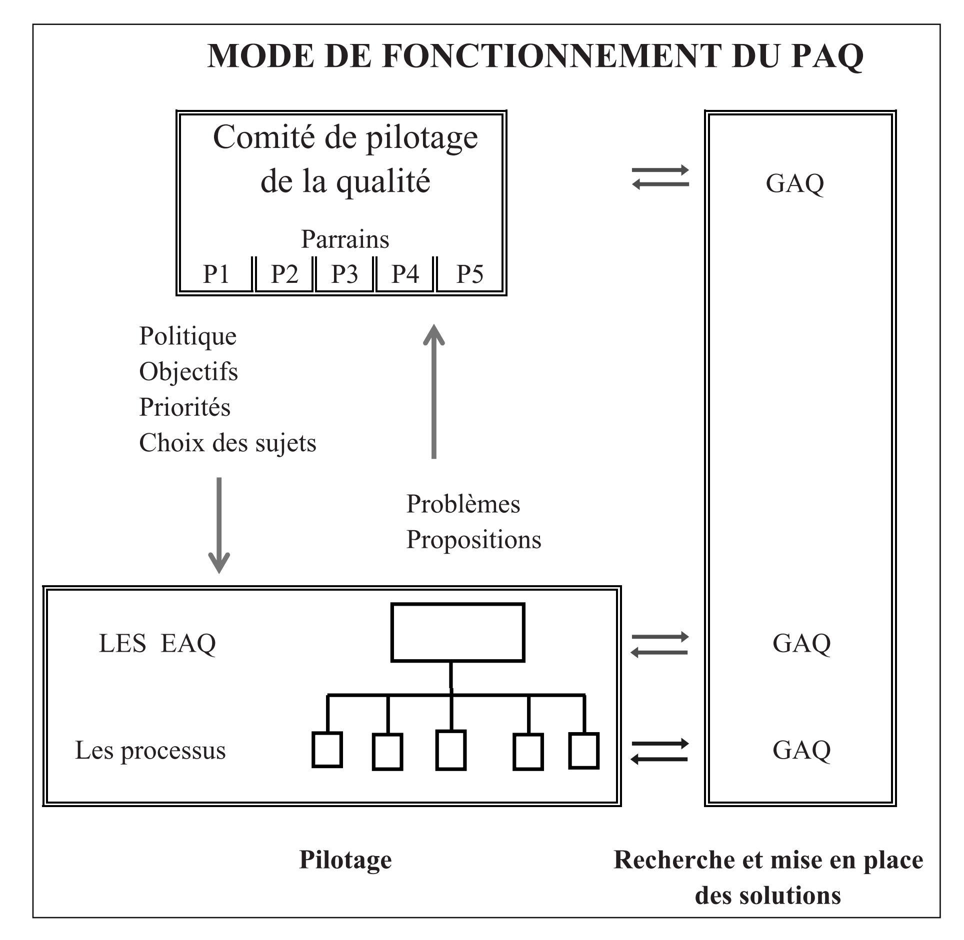


Figure 1.4 Mode de fonctionnement du PAQ

4. Une autre source d'inspiration a été l'excellent livre de G. Stora et J. Montaigne : *La qualité totale dans l'entreprise* publié Éditions d'Organisation, 1986.

La structure de management du plan d'amélioration de la qualité est décrite dans le schéma de la Figure 1.4. La présentation qui en est donnée est adaptée à une entreprise relativement importante (de l'ordre de 1 000 personnes ou plus). Pour une entreprise plus petite il faut beaucoup simplifier. À l'inverse, pour une très grosse entreprise, il peut être nécessaire de mettre en place plusieurs niveaux de management du plan supplémentaires. Ce tableau montre une distinction très forte entre, sur la partie gauche, une structure de pilotage et, sur la partie droite, des groupes opérationnels chargés de résoudre les problèmes et de mettre en place les solutions.

L'organisation de cette structure de management du PAQ est prioritairement basée sur les processus voire les activités, mais il est possible de s'appuyer sur les services. Nous allons prendre le cas d'une gestion par processus.

Elle comprend :

– un Comité de pilotage ;
– des EAQ (équipes d'amélioration de la qualité) chargées de relayer le Comité de pilotage à un niveau plus opérationnel ;
– des GAQ (Groupes d'amélioration de la qualité).

1.5.5 Le Comité de pilotage

● **Sa mission**

Il lui est demandé de gérer l'amélioration permanente de l'ensemble de l'entreprise et de s'assurer de la cohérence des actions entreprises.

● **Ses fonctions**

– Définir la politique, la stratégie, les objectifs généraux de l'entreprise et les indicateurs associés.
– Les faire connaître et fixer les priorités.
– Valider les objectifs d'amélioration des processus ou services en s'assurant de leur cohérence avec ceux de l'entreprise.
– Suivre l'état d'avancement des projets.
– Lancer et suivre un plan de formation spécifique au PAQ.
– Reconnaître les mérites.
– Lancement de groupes de travail sur des thèmes se situant au niveau de l'entreprise et non des EAQ et Pilotes de processus.

1.5.6 Les EAQ

- **Leurs missions**

Les EAQ sont des Comités se situant entre le Comité de pilotage et les Processus ou services. Une EAQ est formée d'un groupe de pilotes de processus et/ou de chefs de service. Le rassemblement en groupes de processus les plus homogènes possible pour former une EAQ peut être un peu délicat mais celui-ci s'impose dès qu'une entreprise est quelque peu complexe car, dans ce cas, traiter tout directement du Comité de pilotage s'avère trop lourd.

- **Leurs fonctions**

– Consolider les objectifs des différents processus concernés avant présentation au comité de pilotage.
– Lancer des GAQ en fonction des problèmes à résoudre et des priorités, et ceci en accord avec le Comité de pilotage. Un point important est le lancement d'un nombre réaliste de groupe de travail et la gestion du choix des participants à ces groupes, sachant que le risque est de mettre toujours les mêmes personnes, les plus compétentes et les plus motivées.
– Suivre l'état d'avancement des projets ou plans d'action.
– S'assurer que les ressources sont adaptées et demander les allocations nécessaires.
– Gérer le plan de formation du PAQ pour les services concernés par l'EAQ.
– Reconnaître les mérites.

Il est souhaitable que chaque EAQ soit parrainée par un membre du Comité de pilotage.

La fréquence des réunions doit être régulière (de l'ordre d'une par mois : à déterminer par l'EAQ).

1.5.7 Les pilotes de processus

Leur rôle sera d'assurer le déploiement des objectifs à deux niveaux :

– partant des objectifs de la direction, déploiement au niveau du processus avec les responsables des services concernés ;
– ensuite, partant des objectifs au niveau du processus, les déployer au niveau des « activités » constituant le processus, si nécessaire.

Cette recherche se fait en groupes organisés par le pilote de processus et selon la méthode proposée au paragraphe 1.6.

1.5.8 Les groupes de travail GAQ

● **Leur mission**

Les groupes de travail sont lancés pour traiter des problèmes bien définis et dans un temps déterminé, avec un budget alloué si nécessaire.

● **Leurs fonctions**

– Analyser le problème posé et identifier les difficultés.
– Proposer des solutions.
– Chiffrer ces solutions et analyser leurs implications.

● **Leur fonctionnement**

Ces groupes ont donc un caractère temporaire.

Ils sont lancés par le Comité de pilotage, une EAQ (cas le plus général) ou un pilote de processus ou chef de service selon l'étendue du problème à traiter ; mais cela doit toujours se faire en liaison avec le Comité de pilotage. En effet, il est très important que tout projet soit identifié et reconnu par le Comité de pilotage.

Un GAQ doit travailler selon une méthodologie rigoureuse faisant l'objet d'une formation. (*Les outils du travail en groupe sont présentés dans le chapitre 2 « Méthodologie et management des groupes de résolution de problèmes ».*)

Lorsqu'un GAQ a terminé sa mission, l'animateur du groupe doit présenter les conclusions devant l'instance qui lui a confié sa mission, et ceci en présence des membres du GAQ concerné. Il sera bon, dans certains cas, de faire cette présentation devant le Comité de pilotage, même si ce n'est pas lui qui a lancé ce groupe de travail.

Lorsque les propositions d'un groupe de travail sortent de la responsabilité d'un service ou d'une EAQ, elles doivent être soumises au Comité de pilotage pour accord.

1.6 Méthode de déploiement[5] des objectifs

1.6.1 Le principe

Chaque entité de l'entreprise travaille avec des objectifs d'amélioration précis, chiffrés dans la mesure du possible, selon un programme de travail rigoureux, et dans le sens de la politique et des objectifs de l'entreprise.

Chaque objectif doit se traduire par un ou des plans d'action. Un plan d'action est un programme de travail précis, écrit, avec des responsabilités définies, un planning, un budget éventuellement. Il doit faire l'objet d'un suivi régulier.

Rappelons que dans notre exemple il y a deux niveaux de déploiement :

– des objectifs de la direction à ceux de chaque « processus » ;
– des objectifs du processus à ceux des « activités ».

Cela se fait en groupe de travail animé par le pilote de processus concerné. On procède en deux temps :

– recherche des objectifs possibles ;
– sélection des objectifs.

Le tableau 1.3 propose un exemple de déploiement vis-à-vis du processus de conception. Ce tableau est partiel. Son but est de donner quelques exemples permettant de marquer la différence entre : politique, objectifs d'amélioration, projets et plan d'action.

1.6.2 La recherche des objectifs d'amélioration

Les objectifs d'amélioration sont recherchés au cours d'une séance de « remue-méninges » (*Brainstorming*).

Pour faciliter cette recherche, nous proposons le guide suivant, résumé dans la Figure 1.5 :

– Les objectifs peuvent être recherchés dans le cadre des relations clients fournisseurs internes :
  - un problème de non-satisfaction du client interne
  - des dysfonctionnements internes à l'activité
  - des difficultés avec les fournisseurs internes de l'activité

---

5. La norme ISO 9001:2008 n'emploie jamais le terme de « déploiement des objectifs qualité » mais parle de leur « cohérence », ce à quoi tend notre méthode.

– Les objectifs peuvent concerner :

> La qualité (une **« performance »** à améliorer) :
Exemples achats :
- augmenter le nombre d'actions de coopération avec des fournisseurs,
- augmenter le nombre d'opérations de partenariat.
- réduire le nombre de références à acheter,

> La qualité (une **« non-conformité »** à réduire) :
Exemples conception :
- réduire le nombre de développements hors délai
- réduire le nombre d'erreurs dans la création des nomenclatures.

> Les coûts
Exemple : réduire les frais de déplacement

> Les délais
Exemple : réduire le temps de développement

> Parfois un projet à développer :
Exemples :
- mettre en place une saisie d'informations informatique en production des défauts sur les composants achetés ;
- mettre en place un système d'évaluation des fournisseurs.

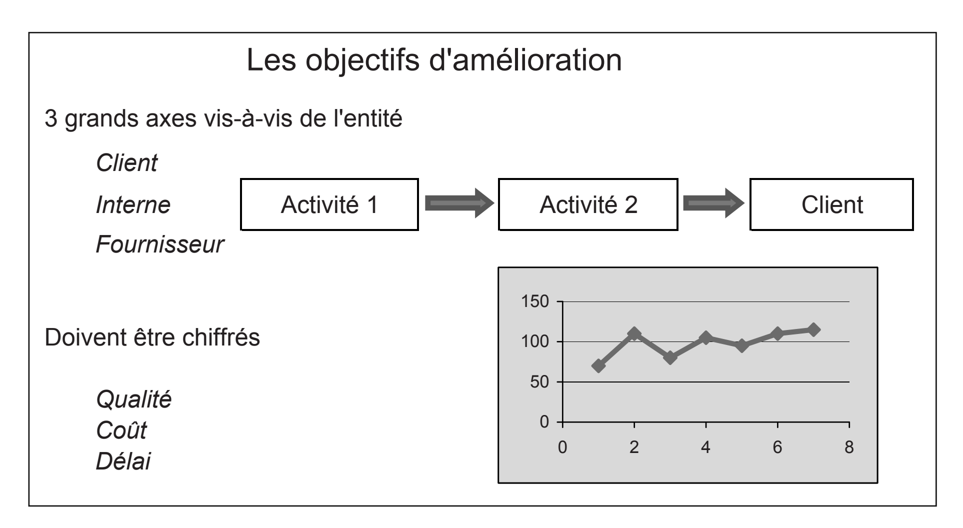


Figure 1.5 Guide pour la recherche des objectifs

Tableau 1.3 Tableau de déploiement (exemple avec le processus de conception)

Entreprise		Conception		
Politique **• Objectif**	**Indicateurs**	**Politique** **• Objectif** **➢ Projet**	**Indicateurs**	**Plans d'actions**
Améliorer la satisfaction des clients par une meilleure fiabilité de nos produits :		Adapter nos spécifications aux besoins des clients		
• améliorer le taux de satisfaction	Taux de satisfaction au questionnaire	• Améliorer la fiabilité des produits • Simplifier la maintenabilité des produits	λ produits finis[6] λ produits achetés	Lancement des études AMDEC[7] systématiques
• diminuer le taux de mécontentements		• Améliorer la durabilité des produits	Vie utile Durée de vie moyenne des produits	Intensification des moyens de tests d'endurance
		➢ Développer l'Analyse de la valeur		
Réduire les temps de conception	Durée de développement	• Réduire le temps des essais • Réduire le temps des études • Respecter les délais de développement ➢ Informatiser le planning	le taux de respect des délais Surcoûts pour palier au non-respect des délais	

Tableau 1.3 Tableau de déploiement (exemple avec le processus de conception) (fin)

Entreprise		**Conception**		
Politique **• Objectif**	**Indicateurs**	**Politique** **• Objectif** **➢ Projet**	**Indicateurs**	**Plans d'actions**
		• Respecter les délais des modifications	Le nombre de modifications hors délais	
Intensifier l'innovation • développer l'innovation dans nos produits • développer l'innovation dans nos moyens de production		Intensifier l'innovation dans nos produits ➢ Recherche de nouvelles technologies ➢ Rechercher des fournisseurs innovants • augmenter le nombre de brevets Développer l'innovation dans nos moyens de production		
Avoir une politique de normalisation		Réduire le nombre de composants Créer une liste préférentielle		
Être à l'écoute de nos clients				
Réduire les délais de livraison				

6. λ : Taux de défaillances.
7. AMDEC : Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leur criticité (*voir chapitre 12*).

– À un objectif doit nécessairement être associé un ou plusieurs indicateur(s). Ce dernier doit :
  - permettre de mesurer une amélioration ;
  - être fidèle dans le temps ;
  - être fiable ;
  - être simple ;
  - être représentatif de l'objectif.
– Il faut définir pour chaque indicateur :
  - sa méthode de calcul ;
  - sa fréquence ;
  - la personne en charge d'assurer le calcul, la diffusion des résultats ;
  - la source des données.

Exemple : Le taux de respect des délais de développement.

- Calcul : pour les développements en cours et pour les 3 derniers développements terminés : proportion des phases hors délai/phases réalisées (il est en général préférable de choisir comme unité des proportions ou des taux car les nombres risquent de ne pas être fidèles dans le temps. Par exemple, si l'entreprise double son activité un taux peut rester stable alors que les quantités vont nécessairement augmenter).

- Fréquence : mensuelle.

- Responsable : responsable de la gestion des plannings de développement.

- Source : système informatique de suivi des plannings de développement.

1.6.3 Le bon usage des indicateurs

Il est impératif d'éviter de faire des indicateurs un outil coercitif. L'expérience montre que, d'une façon quasi générale, lorsqu'un indicateur révèle des erreurs, les responsabilités sont multiples. Et, en tout état de cause, dès que l'on veut sanctionner à partir des résultats, le système perd grandement de son efficacité. L'indicateur doit être vu d'une façon positive, comme un outil de progrès. On sanctionne naturellement une faute professionnelle mais pas une erreur.

1.6.4 La sélection des objectifs

La séance de recherche des objectifs d'amélioration débouche en général sur un grand nombre d'objectifs parmi lesquelles il faut faire une sélection. Pour cela,

nous proposons le Tableau 1.4 (*page suivante*). Son principe est une méthode de « critère de choix » avec comme principal critère, la cohérence avec les objectifs du niveau supérieur.

Nous proposons un exemple de recherche des objectifs du processus Achat vis-à-vis des objectifs de l'entreprise.

On écrit les objectifs de l'entreprise dans la partie supérieure, ceux proposés pour le processus achats dans la partie inférieure. Aux objectifs de l'entreprise est associée une pondération déterminée par le comité de pilotage.

Prenons l'exemple de l'objectif achat n° 3 (augmenter le nombre de fournisseurs classés A) les corrélations avec les objectifs de l'entreprise (nous avons donné sur le tableau le nom de « efficacité ») sont respectivement estimés sur une échelle de 0 à 10 par le groupe par :

- 5 avec l'objectif de l'entreprise n° 1 : Améliorer la fiabilité de nos produits
- 2 avec l'objectif de l'entreprise n° 2 : Accroître le chiffre d'affaire
- 2 avec l'objectif de l'entreprise n° 3 : Réduire les charges compressibles
- 5 avec l'objectif de l'entreprise n° 5 : Améliorer la qualité de prestation des services fonctionnels

Ce qui donne un total de 32,5 en prenant en compte les pondérations respectives (3 ; 3 ; 2 ; 1,5).

Nous pouvons associer d'autres critères de choix. Ici nous avons opté pour deux critères assez classiques :

Un critère de « force ou faiblesse » dit « Capacité » : il s'agit de prendre en charge de préférences les objectifs les plus réalistes ou pour lesquels nous avons des capacités favorables. Nous avons simplifié ici en ne prenant que deux niveaux : 1 favorable ; 0,7 défavorable.

Un critère de « menace opportunité » dit « Contexte » : il s'agit de prendre en charge de préférences les objectifs dont le contexte est le plus favorable par exemple un climat social ou une conjoncture favorable. Nous avons simplifié ici en ne prenant que deux niveaux : 1 favorable ; 0,7 défavorable.

Dans notre exemple nous avons considéré que ces deux points étaient défavorables, ce qui donne pour ce que nous avons appelé le « poids total » le produit 32,5 x 0,7 x 0,7 = 16. (Nous avons préféré un produit plutôt qu'une somme).

À chaque objectif sera associé :

- Un indicateur ;
- Un plan d'action ;
- Un responsable ;

Tableau 1.4 Tableau de déploiement des objectifs d'amélioration

Tableau de déploiement des objectifs

DATE:

UNITE:

Objectifs Entreprise

7

6

5 Améliorer la qualité de prestation des services fonctionnels

4 Accroitre les actions de formation

3 Réduire les charges compressibles de 5% par an

2 Accroitre le chiffre d'affaire de 20%

1 Améliorer la fiabilté de nos produits

SOMME pondérée des efficacités A

CAPACITE (0,7 : faiblesse; 1 : force) B

CONTEXTE (0,7 : menace; 1 : opportunité) C

	6	5	4	3	2	1									
	1	2	3	4	5	6	7	A	B	C	POIDS TOTAL =A x B xC		PA	Respons.	Aspects subjectifs (politiques, sociaux, culturels)
PONDÉRATION (1, 2, ou 3)	3	3	2	2	1,5								o/n	Nom	Remarques diverses
Objectifs du processus achat			**EFFICACITÉ**									**INDICATEUR**			**OBSERVATIONS**
	corrélation avec les objectifs supérieurs								(internes)	(externe)					
1 Accroitre les gains obtenus par négociation		5	8		10			46	0,7	1	32,2				
2 Réduire le nombre de références à acheter		2	2		10			25	1	0,7	17,5				
3 Augmenter le nombre de fournisseurs classés A	5	2	2		5			32,5	0,7	0,7	15,9				
4 Augmenter le nombre d'actions de partenariat	5	3			2			27	1	1	27				
POIDS TOTAL	10	12	12		27			130,5			92,63				

– Des commentaires avec notamment des aspects subjectifs qui peuvent influencer la décision de choisir ou non un objectif.

À noter que le total par colonne donne une estimation de la prise en compte des objectifs de l'entreprise.

Le tableau ainsi constitué sera la base de la présentation au comité de pilotage qui choisit les objectifs à retenir et éventuellement en rajoute d'autres.

Concernant le déploiement des objectifs du processus vers ceux des activités du processus on pourra se reporter au cas du processus « Achats/Approvisionnement » et celui du processus « Conception » où est présenté un exemple (*Voir chapitres correspondants*).

1.6.5 La visibilité des objectifs

Il nous paraît essentiel que les indicateurs fassent l'objet de graphiques montrant les évolutions et que ceux-ci soient affichés. C'est un moyen important de sensibilisation et de reconnaissance des mérites.

1.6.6 L'organisation du déploiement des objectifs et pilotage de l'amélioration

Les grandes lignes de ce que pourrait être un plan annuel d'amélioration sont inspirées du PDCA de Deming et sont présentées ci-après (*Voir Tableau 1.5*).

Par exemple, tous les ans, quelques semaines avant l'établissement du budget de l'année suivante les EAQ coordonnent l'élaboration des tableaux de déploiement des processus par les pilotes de processus. Une première version est présentée au niveau du comité de pilotage qui s'assure de la cohérence d'ensemble et de la compatibilité avec les possibilités financières. Au besoin le comité ajoute des objectifs qu'il estime avoir été négligé ou en supprime qu'il ne juge pas prioritaire.

Les objectifs étant clairement fixés et officialisés les différents niveaux de pilotage lancent d'une façon coordonnée les GAG.

1.6.7 Le tableau de bord stratégique (BSC)

Il nous paraît souhaitable de situer notre méthodologie par rapport à la méthode, devenue traditionnelle, du tableau de bord stratégique (*Balanced Scorecard* : BSC) Nous pensons être cohérents avec cette façon de faire mais les objectifs ainsi définis nous paraissent être des objectifs récurrents d'une année sur l'autre.

Alors que dans notre proposition nous nous intéressons plus particulièrement à des objectifs en relation avec ce que les personnes vivent sur le terrain, et modifiables d'une année sur l'autre.

Tableau 1.5 Plan d'amélioration du processus

Roue de Deming	Actions	Responsables
PLAN	Recherche des objectifs et désignation des responsables Validation par le management Détermination des plans d'action Détermination des ressources Validation objectifs/ressources	Comité de pilotage EAQ Pilotes de processus
DO	Recherche des solutions Mise en place des solutions Validation des solutions	GAQ
CHECK	Suivi régulier (rapports d'avancement, réunions de suivi)	Comité de pilotage EAQ Pilotes de processus
ACT	Améliorations Corrections	GAQ

1.7 Logistique

1.7.1 La logistique : un processus clé

– Nous souhaitons attirer l'attention sur le domaine de la logistique pour trois raisons principales :

– S'agissant du **Management de la Qualité**, un élément important de la satisfaction du client est la livraison des quantités prévues dans les délais annoncés, ceux-ci devant être les plus courts possibles. Cela est le résultat d'une logistique performante, même si ce thème ne fait pas explicitement partie de la norme ISO 9001.

– S'agissant d'une approche **Qualité Totale**, la logistique est un élément important de la bonne gestion d'une entreprise et doit en être un paramètre clé, sans oublier que la maîtrise des stocks peut représenter un enjeu financier de premier ordre.

– Il est traditionnel de décliner la satisfaction du client suivant les trois composantes essentielles du service rendu au client : Prix, Qualité, Délai[8]. En pratique, ces trois thèmes sont tout à fait interdépendants. En particulier, la notion de « juste à temps » qui prend une importance de plus en plus grande, est très associée au management de la qualité comme on le verra au paragraphe 1.7.3.

1.7.2 La définition de la logistique

D'abord il nous faut définir ce qu'elle recouvre. La logistique est l'activité qui consiste à gérer le **flux physique** des produits aux différents stades, depuis les fournisseurs jusqu'aux clients.

La logistique part du client pour arriver au client et concerne de nombreux secteurs de l'entreprise, particulièrement : marketing, commercial, conception, production, achats, approvisionnements, distribution physique incluant la gestion des magasins et des transports.

1.7.3 Le double flux

La logistique implique la gestion d'un double flux : le flux physique des produits et le flux des informations nécessaires à la gestion de ce flux physique. La Figure 1.6 donne un exemple de ce double flux.

On peut voir sur la figure 1.6 les éléments suivants :

● **Le flux d'informations**

Sur la partie gauche de la figure nous voyons le type d'informations à traiter :

– prévisions de ventes ;
– traitement des commandes ;
– différents plannings :
    - plannings commerciaux,
    - plannings de production,
– PDP (Plan de production), ordonnancement ;
– commandes fournisseurs ;
– gestion des approvisionnements.

8. Le terme « logistique » serait mieux adapté que « délai » qui est beaucoup trop restrictif.

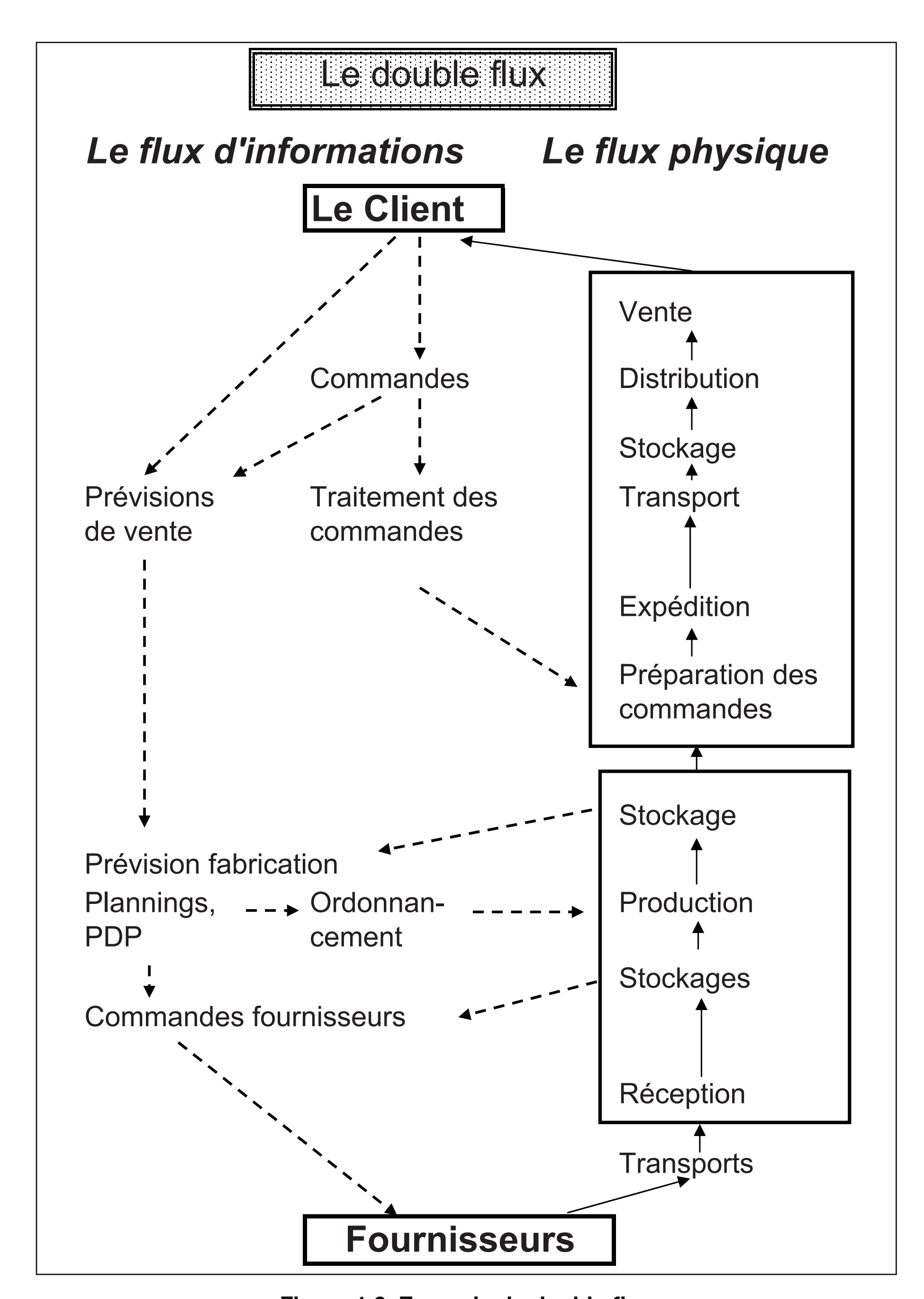


Figure 1.6 Exemple de double flux

Pour les plannings il faut distinguer :

– les plannings à long terme qui ont un caractère stratégique ;
– les plannings à moyen et court termes.

Nous ajouterons les informations relatives au traitement des factures fournisseurs qui sont parfois délicates à gérer.

● **Le flux physique**

Cette gestion d'informations est en quelque sorte le moteur du flux des produits. Dans l'exemple de la Figure 1.6, nous voyons ce flux dans la partie droite. Celui-ci part des composants et matières venant des fournisseurs pour alimenter la fabrication *via* des magasins ; ensuite les produits finis partent, via des magasins ou des entrepôts, dans le circuit commercial pour arriver chez le client ; tout ceci avec un ensemble de moyens de transport et manutention. Le circuit commercial est d'autant plus complexe que l'entreprise travaille pour différents pays. Pour l'entreprise, cette gestion du flux de produits peut représenter des coûts très importants.

● **Les stocks**

Ce double flux se traduit nécessairement par des stocks tout le long du processus logistique. Ceux-ci peuvent atteindre des valeurs importantes et, bien sûr, il s'agit de les minimiser autant que possible.

● **Le « Juste à temps » (JAT)**

De plus en plus on adopte une approche « Juste à temps », tendant à éliminer les zones de stockage en allant le plus directement possible du fournisseur à la production, puis de la production aux clients.

Nous aborderons plus en détail cette notion de Juste à temps dans le chapitre sur le « Processus Achats/Approvisionnement » (au § 3.5.6). Nous insistons sur le fait que si le concept de JAT est souvent perçu essentiellement comme moyen de limiter les stocks, il va en réalité beaucoup plus loin. Citons deux aspects importants à nos yeux pour la qualité :

– Le JAT est un outil qui vise à une amélioration de la réactivité et de la flexibilité ce qui va dans le sens d'une meilleure productivité et d'une meilleure satisfaction des clients ;
– Le JAT implique une forte amélioration de la qualité sur plusieurs plans :
    - très bonne qualité des composants et matières car on ne peut, par exemple, supporter un lot mauvais,

  - une très bonne fiabilité des moyens de production tant de l'entreprise que ceux des fournisseurs car un arrêt de production n'est plus acceptable puisqu'il n'y a plus de stock pour assurer la transition.
- Nous voyons à quel point JAT et Qualité sont interdépendants et complémentaires.

● **La nomenclature**

Un produit est fait de composants et matières déclinés dans une « nomenclature ». Ce document est un outil de base. Il doit être traité avec beaucoup de soin car il est souvent source d'erreurs (cela d'autant plus que les produits sont divers et complexes) et implique des choix qui peuvent être lourds de conséquences.

● **La GPAO et les ERP**

La gestion informatique de cet ensemble complexe se fait avec des progiciels. S'agissant de la production et des approvisionnements on parle de GPAO (Gestion de la production assistée par ordinateur). Si l'on considère l'ensemble du domaine on parle de ERP (« *Enterprise Resource Planning* » en anglais, littéralement « planification des ressources de l'entreprise »). En pratique, les ERP ont tendance à intégrer l'ensemble des données nécessaires aux différentes fonctions de l'entreprise dans un système informatique centralisé.

Il est clair que la gestion de tels systèmes doit être faite avec beaucoup de rigueur d'autant plus que leur complexité en fait un domaine où les risques d'erreurs sont très nombreux.

1.7.4 Les indicateurs de la logistique

On se référera à Figure 1.7 donnant un exemple de points clés du flux des produits[9]. Le pilotage de la logistique nécessite de mettre en place un certain nombre d'indicateurs vis-à-vis desquels il faudra se fixer des objectifs et organiser des plans d'actions si nécessaire pour les atteindre ou les améliorer.

On donne ci-dessous, sous forme de tableaux (*Tableaux 1.6 A et 1.6 B*), une liste d'indicateurs possibles à titre d'exemple pour les différents secteurs concernés.

---

9. Un triangle pointe en bas représente traditionnellement un stockage.

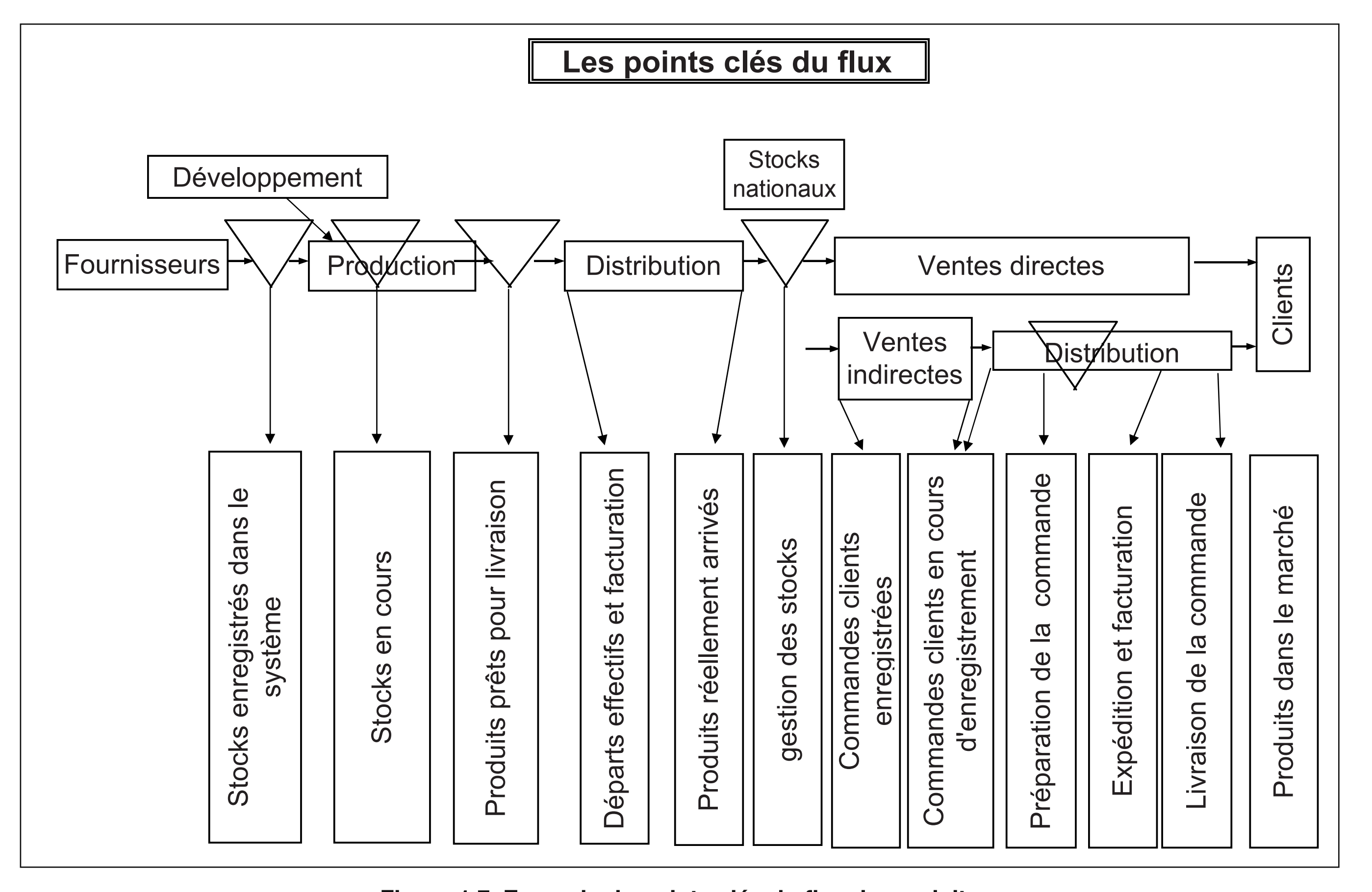


Figure 1.7 Exemple de points clés du flux de produits

Tableau 1.6 A Exemple d'indicateurs suivant les stades du flux des produits

Stade	Indicateurs
Développement	Respect des plannings de développement Durée des développements
Fournisseurs/approvisionnement	Fiabilité des livraisons. Respect : – des dates (retard, avance) – des quantités – des conditionnements – des adresses de livraison Taux de ruptures Durée de livraison Temps de cycle de livraison (*lead time*)
Production (volume/mix, article)	Temps de cycle de production (*lead time*) Flexibilité et respect des plannings (volumes, volume/mix[10], article) Arrêts de production
Distribution	Temps de cycle Fiabilité de distribution (volumes/mix…)
Service	Niveau de service Respect des commandes Taux de ruptures

Tableau 1.6 B Exemples d'indicateurs relatifs aux stocks

Stade	Indicateurs
Réception fournitures (magasin) Différents stades de production (en cours et stade final) Avant expédition (magasin) Entrepôts nationaux Magasins commerciaux Etc.	Quantités Valeurs Taux de rotation Etc.

10. « Volume » correspond à l'ensemble des familles de produits ; le « Mix » correspondant au détail par famille.

1.7.5 Conclusion sur l'impact de la logistique sur la qualité

Ce rapide survol de la logistique a permis de montrer à quel point ce domaine qui peut devenir très complexe pour les grosses entreprises produisant de nombreuses familles de produits est important pour la qualité des produits et plus particulièrement dans une approche qualité totale. Sa complexité indique combien les **risques d'erreurs** sont nombreux aux différents stades : planification, gestion des approvisionnements, traitement des commandes, nomenclatures, stocks, etc. De plus, les choix ou décisions prises tout le long du processus peuvent avoir des conséquences importantes sur :

– la qualité du service aux clients ;

– la bonne marche de l'entreprise.

Par ailleurs, les systèmes de gestion type ERP présentent l'avantage important de fournir de **nombreux indicateurs** donnant un support considérable au management de la qualité.

1.8 Rédaction d'un questionnaire pour enquête de satisfaction

1.8.1 Objectif

Il y a de nombreuses situations en management de la qualité où l'on souhaite connaître la satisfaction des personnes ou entreprises. On souhaite avoir une évaluation :

– des clients sur la qualité des produits ou/et du service ;

– d'un panel de clients à l'occasion d'un lancement d'un nouveau produit ;

– du personnel sur les conditions de travail, une nouvelle organisation, un plan d'améliorations tel que la communication...

– des personnes de l'entreprise sur la qualité des fournisseurs (on organise par exemple un panel de personnes en contact avec les fournisseurs) ;

– des fournisseurs sur la qualité de nos relations ;

– etc.

1.8.2 Échantillonnage représentatif

D'abord, la consultation doit se faire sur un échantillonnage représentatif de la population concernée (*pour cela, on se reportera au paragraphe 10.9*).

1.8.3 Construction du questionnaire

La construction du questionnaire doit s'opérer en pensant à l'exploitation que l'on veut (ou peut) en faire, et du contexte. Pour chaque question, il convient de se poser la question : à quoi cela répond-il ? comment va-t-on l'exploiter ? comment va-t-elle être perçue ?

Par exemple, trop de questions peuvent rendre le questionnaire inexploitable et indisposer la personne y répondant.

On distingue deux types de questions.

● Les questions sur la personne qui répond

On utilise de préférence des blancs à remplir :

Âge : ☐ < 20 ans
☐ 20 à 30 ans
☐ etc.

Adresse :
Ville :
Pays :
Profession :

Ces questions doivent donc être **peu nombreuses** et **simplifiées** au maximum. Il faut toujours penser à l'exploitation que l'on en fera.

> Par exemple : « Profession » est ambigu : on peut répondre par salarié, profession libérale, fonctionnaire, artisan… ou par technicien, analyste financier… et l'ensemble des réponses ne pourra pas être exploité. Le mieux est de proposer une liste type qui sera fonction de ce que l'on cherche.

● Les questions sur la satisfaction

Chaque question doit être exprimée en fonction de ce que l'on cherche à estimer.

Une quantification de la réponse est souhaitable autant que possible.

On distingue plusieurs façons de poser des questions pour lesquelles le tableau suivant (*Tableau 1.7*) montre les avantages ou inconvénients.

Tableau 1.7 Guide de rédaction d'un questionnaire de satisfaction

Type de question	Exemple	Avantages	Inconvénients
Questions ouvertes	Que pensez-vous de nos produits :	Donne beaucoup de liberté à la personne questionnée	Exploitation difficile et longue. Il faudra donc en limiter l'usage à un complément d'informations et limiter la place impartie à la réponse.
Questions par oui/non	Êtes-vous satisfait de la qualité de nos produits : ☐ oui : ☐ non :	Exploitation simple	Peu exploitable surtout si la question permettait une réponse nuancée
Questions avec cotation Ne doit pas excéder 5 catégories (4 niveaux sont parfois conseillés car cela interdit de prendre une position neutre)	Ce fournisseur a-t-il un comportement partenarial ? : ☐ 1 : faible ☐ 2 : moyen faible ☐ 3 : moyen ☐ 4 : moyen fort ☐ 5 : fort	Exploitation facile permettant d'évaluer par une note	L'échelle des valeurs est différente selon les personnes

Tableau 1.7 Guide de rédaction d'un questionnaire de satisfaction (fin)

Type de question	Exemple	Avantages	Inconvénients
Questions avec évaluation Une échelle définie des niveaux	Ce fournisseur a-t-il un comportement partenarial ? : ☐ 1: Nous n'obtenons jamais d'aide de sa part ☐ 2 : Parfois il nous aide ☐ 3 : Assez souvent ☐ 4 : La plupart du temps ☐ 5 : Systématiquement	Bonne méthode Les réponses sont peu ambiguës	Ne met en valeur qu'un aspect de la réponse
Questions avec évaluation Signification précise des différents niveaux	Ce fournisseur a-t-il un comportement partenarial ? : ☐ 1 : Nous n'obtenons jamais d'aide de sa part sur quelque sujet que ce soit ☐ 2 : Parfois il nous aide mais cela est limité à un sujet (logistique, réduction de prix, amélioration produit…) ☐ 3 : Assez souvent sur des sujets différents ☐ 4 : La plupart du temps mais pas sur tous les sujets ☐ 5 : Systématiquement sur quelque sujet que ce soit	Méthode souhaitable car le niveau correspond à quelque chose d'identique pour chaque personne questionnée.	Pas toujours facile à rédiger

2

Les outils du travail en groupe

2.1 Méthodologie et management des groupes de résolution de problèmes

2.1.1 Principes du management des groupes de travail

● **Problèmes récurrents**

Nous nous intéressons dans ce document à la résolution de problèmes **récurrents** par opposition au traitement de problèmes ponctuels à caractère **accidentel** qui relèvent d'une démarche différente et d'outils particuliers.

● **Efficacité des groupes de travail**

Le travail en groupe peut être très efficace grâce à l'apport complémentaire des différents membres du groupe. Il crée un enrichissement mutuel. Mais il peut s'avérer très médiocre voire néfaste si le travail du groupe n'est pas bien structuré. Le groupe risque de s'enfermer dans des conflits et les réunions peuvent devenir des séances de bavardage.

Pour cela il faut :

- Une méthodologie rigoureuse. Le risque principal d'une mauvaise méthode est la tendance naturelle à aller directement aux solutions sans passer par la phase indispensable de recherche des causes.
- Un management par la hiérarchie très organisé. Celle-ci doit déterminer les sujets, piloter les groupes, former les participants, prendre en compte les résultats des groupes, motiver les participants…

Ce sont ces points que nous allons examiner.

2.1.2 Formation au travail en groupe

● Formation indispensable

Les groupes de travail doivent avoir été formés au travail en groupe. Une formation particulière doit être proposée aux animateurs. Nous proposons les points suivants qui doivent être au cœur de cette formation.

● Formation à l'animation d'un groupe de travail

Les principes de base de l'animation

L'animateur doit :

- Faire participer chaque membre du groupe d'une façon équilibrée :
  - faire parler les silencieux ;
  - maîtriser ceux qui parlent trop.
- S'effacer au profit du groupe.
- S'exprimer clairement.
- Maîtriser les outils audiovisuels.
- Susciter les idées.
- Noter au « paperboard » ou au tableau toutes les idées émises.
- Ramener le groupe sur son sujet.
- Maîtriser le temps.

La gestion de la réunion de travail

L'animateur doit :

- Préparer son animation.

– Bien définir le sujet.
– Pratiquer le plus souvent possible « le tour de table » pour solliciter les avis.
– Faire des synthèses, reformuler les conclusions ou les points importants.
– Répercuter les questions sur le groupe.
– Noter les idées au tableau.
– Présenter l'ordre du jour de la réunion.
– Fixer une durée : une à deux heures maximum.
– Terminer chaque réunion avec un programme de travail défini en vue de la prochaine réunion avec des responsables (en général plusieurs réunions sont nécessaires). C'est hors réunion que le travail principal est réalisé.
– Faire intervenir à bon escient des spécialistes ou experts du sujet traité.

Les travaux du groupe doivent faire l'objet d'un rapport final aussi synthétique que possible en insistant sur les conclusions.

● **Formation à la participation à un groupe de travail**

Les participants doivent :

– Savoir écouter.
– Être constructif, plutôt faire évoluer une idée que de la critiquer.
– Ne pas hésiter à poser des questions, à dire que l'on ne comprend pas.
– Penser d'abord au succès du groupe.

2.1.3 Management des groupes de travail

Les groupes doivent travailler dans un contexte de management avec un responsable hiérarchique (appelons-le « parrain » du groupe) qui pose le problème, crée le groupe en en déterminant l'animateur et les membres. Parfois un « comité de pilotage » des groupes est souhaitable au niveau de l'entreprise, dans ce cas chaque groupe doit se voir affecter un « parrain » responsable de son suivi. Ce comité s'assure du bon fonctionnement général des groupes, de la formation au travail en groupe, de la bonne répartition des personnes dans les différents groupes, etc.

Un aspect essentiel de ce management est la motivation des membres des groupes. À ce titre, la prise en considération des résultats des groupes et la bonne mise en œuvre des propositions des groupes sont capitales.

Par ailleurs, le responsable qualité doit s'assurer du bon fonctionnement des groupes sur le plan méthodologique. Pour cela, nous proposons deux documents :

– le plan de la méthode en **huit étapes** avec indication des **outils recommandés** ;
– une fiche de suivi reprenant les huit étapes.

2.2 Méthode de résolution des problèmes récurrents en huit étapes

2.2.1 Méthode en huit étapes

La méthode proposée est en huit étapes conformément au tableau suivant (*Tableau 2.1*). Chaque étape définit les actions à mener avec en vis-à-vis des méthodes ou outils conseillés. Toutes ces méthodes et outils ont prouvé leur grande efficacité depuis de nombreuses années.

2.2.2 Suivi de réalisation des étapes

Une fiche de suivi est recommandée pour formaliser le déroulement des étapes (*Voir Tableau 2.2*). Elle est remplie systématiquement au fur et à mesure de l'avancement des travaux par le secrétaire du groupe et diffusée notamment au « parrain » et au responsable qualité. Il ne s'agit pas d'un rapport technique mais d'une fiche très synthétique qui permet au « parrain » de s'assurer de la bonne évolution des travaux et au responsable qualité de faire, si nécessaire, une sorte d'audit du fonctionnement des groupes dans le respect de la méthode et notamment de la bonne utilisation des outils recommandés.

2.3 Remue-méninges ou *Brainstorming*

2.3.1 But du remue-méninges

Cette méthode de travail en groupe est une méthode de créativité permettant de produire un maximum d'idées sur un thème donné.

Tableau 2.1 Méthode de résolution des problèmes récurrents en 8 étapes

LES ÉTAPES	LES MÉTHODES ET OUTILS
1. IDENTIFIER LE PROBLÈME Le définir vis-à-vis d'un thème donné ET SE L'APPROPRIER S'assurer qu'il est bien compris Quelle est sa nature ? Quel est l'objectif ?	Diagramme des affinités (KJ) Tour de table, QQOQCP
2. IDENTIFIER LES ACTIONS IMMÉDIATES Si le problème a un impact client, examiner si des actions provisoires ne doivent pas être entreprises	
3. ANALYSER LE PROBLÈME (LES FAITS) Analyse des données Analyse des observations disponibles Établissement d'un programme de relevés Exploitation des données	QQOQCP Feuilles de relevés d'informations Analyse de processus, Statistiques descriptives (Tableaux doubles entrées, Graphiques chronologiques, histogrammes, diagrammes…)
4. RECHERCHER LES CAUSES Lister les causes possibles Analyser Sélectionner et pondérer Vérifier	 Remue-méninges (« Brainstorming ») Diagramme causes/effet Vote pondéré, Diagramme de PARETO des causes Graphique de Corrélation Plan d'expériences

Tableau 2.1 Méthode de résolution des problèmes récurrents en 8 étapes (fin)

LES ÉTAPES	LES MÉTHODES ET OUTILS
5. RECHERCHER ET CHOISIR DES SOLUTIONS Rechercher Chiffrer les enjeux Choisir ou proposer (décisions et investissements)	 Remue-méninges (« Brainstorming ») Tableau causes/solutions Tableaux enjeux (coût/gain, avantages/inconvénients) Matrice de compatibilité et les Critères de choix Vote
6. PRÉSENTER LA OU DES SOLUTIONS EN VUE DE LA PRISE DE DÉCISIONS (par le management) Présenter les conclusions du groupe en vue de la prise de décision par le management	Présentation des résultats d'un groupe de travail
7. METTRE EN APPLICATION[1] (Selon PDCA) Mise en place de moyens de suivi Tableaux de bord, indicateurs Responsables Plan d'action, Planning Validation	 QQOQCP Feuilles de relevés Graphique de Gantt Rédaction de procédures
8. ASSURER LE SUIVI Suivi des résultats Corrections Standardisation	

1. Le plus souvent les personnes en charges de la mise en place des solutions adoptées par le management sont différentes de celles du groupe.

Tableau 2.2 Fiche de suivi d'un groupe de travail

FICHE DE SUIVI D'UN GROUPE DE TRAVAIL DE RESOLUTION DE PROBLEME RECURRENT			
Nom du groupe : Numéro du groupe : Parrain : Date de lancement :	Animateur : Secrétaire : Participants :		
Objectif :	**Outils utilisés**	**Date**	
		Prévue	**Réalisée**
1 Identification - Appropriation			
2 Identification des actions immédiates			
3 Analyse du problème (les faits)			
4 Recherche des causes			
5 Recherche et Choix des solutions			
6 Proposition des solutions et prise de décisions			
7 Mise en application			
8 Suivi			

Par exemple : choix d'un problème à traiter

- les causes possibles d'un problème
- les solutions possibles à un problème
- les moyens à mettre en œuvre pour mettre en place une solution
- etc.

2.3.2 Déroulement du *brainstorming*

Le déroulement comprend trois phases.

● Phase d'organisation

L'animateur rappelle les principes du remue-méninges :

- 1. Tout dire : variété, diversité (même si l'idée paraît « farfelue »).
- 2. En dire le plus possible : la quantité.
- 3. Piller les idées des autres : analogies, variantes, oppositions.
- 4. Ne pas commenter ni critiquer les idées émises, seules les demandes d'éclaircissement sont autorisées.
- 5. Une seule idée à la fois par participant.
- 6. Faire participer tout le monde. Chacun s'exprime à tour de rôle.

Il est utile de garder cette liste affichée dans la salle de réunion.

L'animateur expose avec autant de précisions possibles le sujet. Il s'assure que le sujet est bien défini, bien délimité et bien compris par tous. Un très rapide débat peut avoir lieu sur le sujet, non pour le traiter, mais pour se familiariser avec lui et s'assurer de son contenu.

L'animateur écrit clairement le sujet qui devra rester exposé pendant toute la séance.

● Phase de production d'idées

Pendant quelques minutes, chacun des participants réfléchit en silence et inscrit sur un papier les idées qui lui viennent.

Au cours de tours de table successifs, chacun expose son idée jusqu'à ce que plus personne ne trouve d'idée nouvelle[2]. Une personne qui n'a pas d'idée passe son tour.

L'animateur note toutes les idées en gros caractères bien lisibles sur un « *paper-bord* » par exemple.

Les idées des autres doivent générer d'autres idées. Ce qui veut dire qu'au cours des tours de tables, de nouvelles idées doivent apparaître.

L'animateur écrit toutes les idées au tableau, en s'assurant qu'elles sont bien comprises. Il peut être amené à les reformuler et doit dans ce cas obtenir l'adhésion de l'émetteur. Seule la clarté de l'idée est prise en compte à ce stade. On s'efforce de faire des phrases courtes, on peut même se limiter à des mots-clés.

L'animateur, par des questions, doit autant que possible relancer le flux d'idées.

Cette phase de production d'idées doit être assez rapide : 5 à 20 minutes.

- **Phase d'exploitation, validation**

L'animateur rejette les idées hors sujet, élimine les redondances, rassemble, avec l'aide du groupe, les idées par nature et par catégorie, en veillant bien à ne pas en perdre.

L'animateur fait avec l'aide du groupe une évaluation d'ensemble et tire des conclusions. Parfois, il est souhaitable d'utiliser des méthodes de pondération, et de définir des critères de choix pour faire le choix entre plusieurs propositions. Le mieux est que ce dernier travail soit réalisé lors d'une séance ultérieure, de telle sorte que les idées mûrissent et se décantent.

2.4 Méthode « Causes-Effet »

2.4.1 But de cette méthode

Cette méthode de travail en groupe est une méthode de créativité mettant en évidence l'ensemble des causes possibles d'un problème (d'un « effet ») et de

---

2. Parfois, cette phase d'expression des idées est laissée libre, chacun s'exprimant à volonté. Le tour de table systématique est recommandé dans la mesure où il permet à tous les participants de mieux s'exprimer et d'éviter que certains monopolisent la parole.

dégager les plus probables. Elle donne une représentation claire et visible par tous les membres du groupe, grâce à un classement par familles et sous-familles, sous forme d'un diagramme dit « de causes à effet » appelé aussi « diagramme d'Ishikawa » du nom de son inventeur.

2.4.2 Déroulement de la méthode

Elle comprend quatre phases.

- **Phase de définition du problème**

L'animateur expose aussi précisément que possible le problème (l'effet). Il s'assure que le sujet est bien défini, bien délimité et bien compris par tous.

L'animateur écrit le problème d'une façon visible par tous. Il doit rester en évidence durant toute la séance.

- **Phase de production d'idées**

Le groupe détermine toutes les causes possibles au cours d'une séance de remue-méninges. L'animateur écrit toutes les causes proposées au tableau, en vrac, en soulignant les mots-clés permettant d'exprimer plus simplement chacune des causes. On ne les discute pas : l'animateur s'assure seulement que tout le monde les comprend clairement.

L'animateur définit avec le groupe 4 à 6 familles de causes.

Dans le domaine de production industriel, le classement suivant, que l'on nomme les « 5 M », est souvent approprié :

Main d'œuvre,	Matériel,	Matières,	Méthodes,	Milieu

Mais il faut se garder de choisir systématiquement ce type de famille.

- **Phase de construction du diagramme**

Le groupe affecte chacune des causes à l'une des familles. Si, pour une famille, les causes sont nombreuses, il faut définir des sous-familles.

L'animateur trace le diagramme sur un grand tableau (effaçable de préférence, de façon à permettre des corrections. On peut aussi utiliser des « post-it ») en ne portant que les mots-clés. Les causes sont prises une par une dans l'ordre où elles ont été énoncées. C'est l'auteur d'une cause qui propose sur quelle

branche la positionner. C'est à ce moment que l'on examine l'opportunité de déterminer des sous-familles.

Souvent le positionnement par l'auteur d'une cause dans une famille plutôt qu'une autre, permet de préciser son idée. Il arrive qu'une cause doive être positionnée dans plusieurs familles.

Si le nombre de familles est trop grand ou trop limité, ce type de diagramme n'est pas nécessairement adapté. Parfois un simple tableau peut suffire.

En traçant le diagramme, d'autres idées doivent émerger. Elles sont ajoutées au fur et à mesure à la liste des causes, sans les porter directement sur le diagramme.

L'exemple suivant (*Figure 2.1*) est relatif à un produit fabriqué en grande série dont le dispositif de liaison tube/caoutchouc (ce dernier étant maintenu par un collier), dans lequel circule un liquide sous pression, a tendance à fuir. Le groupe recherche l'ensemble des causes possibles de ces fuites[3].

● Phase d'exploitation

Le groupe détermine les deux ou trois causes qui paraissent les plus probables. Il faut obtenir un consensus dans le groupe. Pour cela, plusieurs méthodes sont applicables selon la complexité du problème :

– 1. Le groupe se met d'accord tout naturellement sur les causes les plus probables.
– 2. Si cela n'est pas possible, on peut procéder par vote ; c'est la situation la plus fréquente. Le vote porte sur les causes et non sur les familles de causes. Il peut être organisé de la façon suivante : on donne un nombre fixe de gommettes à chacun des participants, charge à eux d'aller les répartir en fonction de leurs priorités sur les causes affichées. Ce travail doit être fait en même temps par tous les membres du groupe de façon à éviter que certains votent en fonction du vote des autres. Il est bon de limiter le nombre de gommettes mises par un membre sur une même cause, par exemple maximum deux gommettes. Le nombre de gommettes données à chacun dépend du nombre de participants ; on choisira un nombre tel que le total soit de l'ordre de 30 à 40. Il est souhaitable de faire une représentation du résultat sous forme d'un graphique de Pareto.

---

3. Pour des raisons de présentation, toutes les causes ne sont pas représentées. Le nombre de causes possibles peut être très élevé.

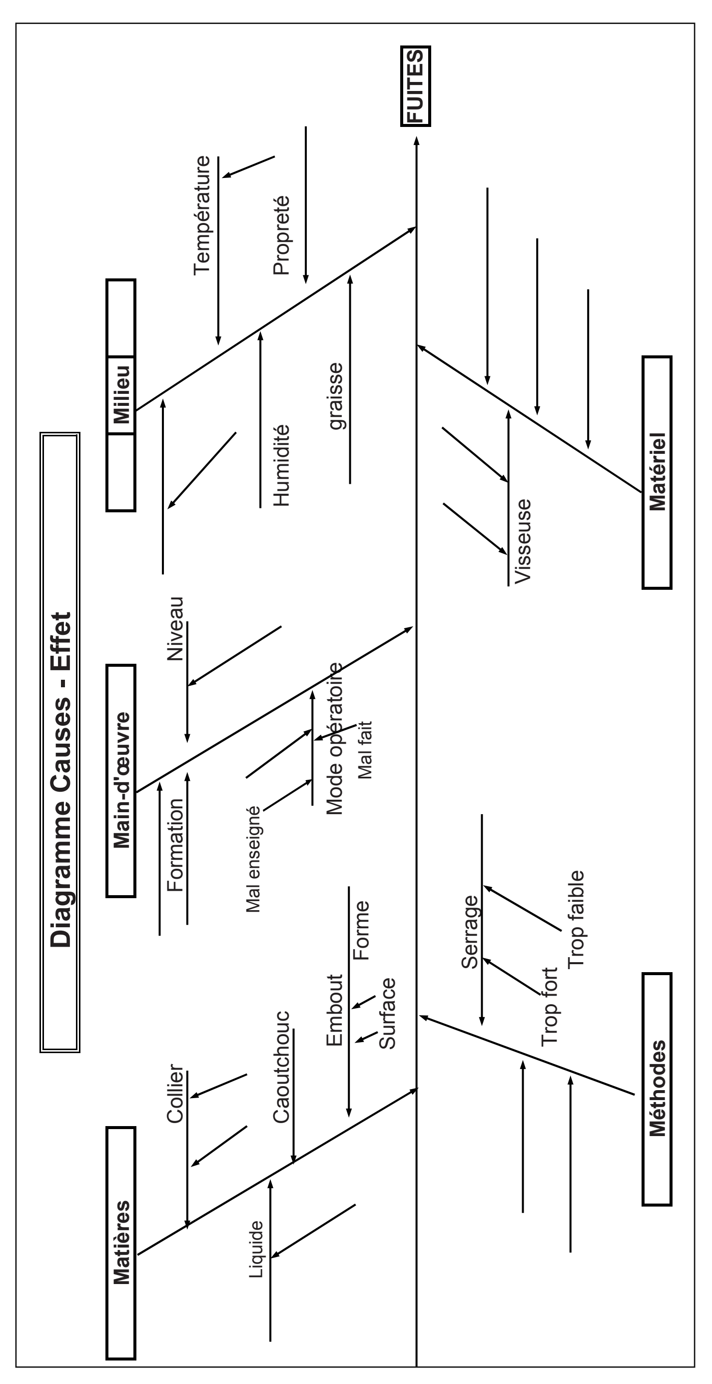


Figure 2.1 Exemple de diagramme causes-effet

– 3. En général, il est nécessaire de prévoir des investigations sur le terrain pour vérifier la validité des causes retenues avant de rechercher les solutions. Cela peut se faire en exploitant des données disponibles avec des outils statistiques tels que : corrélation, régression, multirégression, analyse factorielle etc., ou en faisant des expériences ; dans ce cas les techniques de « plan d'expériences » sont à privilégier.

2.4.3 Méthode CEDAC (*Cause and Effect Diagram with addition of Cards*)

Traditionnellement, le diagramme causes-effets est fait en réunion mais il peut utilement être réalisé en atelier selon la méthode CEDAC qui fonctionne dans ses grandes lignes de la façon suivante : la trame du diagramme est affichée en grand sur un panneau avec le problème à résoudre et les cinq branches correspondant aux 5 M. Chacun place, au moment de la journée qui lui convient, une cause sur un « post-it » d'une certaine couleur et d'autres proposent sous forme d'un post-it d'une autre couleur une proposition de réponse. Les décisions peuvent être formalisées au cours d'une réunion.

2.5 Diagramme des affinités : Méthode KJ

2.5.1 But

Il existe plusieurs méthodes basées sur un diagramme des affinités. La méthode KJ (mise au point par l'anthropologue Jiro Kawakita dans les années 1950) est particulièrement bien adaptée à la clarification des situations complexes et confuses par un groupe de travail.

Partant d'un thème de réflexion, elle permet à un groupe de travail d'identifier les priorités en termes de problèmes à traiter ou d'opportunités d'amélioration.

Le thème est en général prédéterminé et porte sur un sujet important pour le secteur concerné : problèmes dans un secteur de l'entreprise, dysfonctionnements récurrents, recherche d'opportunités d'améliorations, lancement d'un projet, etc.

C'est une méthode de management qui est bien adaptée à des situations relevant de données « sémantiques » par opposition aux données « statistiques ».

Elle se situe dans le P (*To Plan*) du PDCA.

2.5.2 Principe

Les informations se trouvant plus ou moins clairement dans les « têtes » de chacun des participants, vont se trouver structurées sur un papier et partagées par tous les membres du groupe. La prise de décision viendra naturellement.

2.5.3 Déroulement

Il comprend 9 phases.

- **Phase 1 : Expression des observations sur un thème choisi**

L'animateur écrit en haut et à gauche d'une grande feuille de papier le thème retenu. Les participants s'entretiennent d'une façon informelle sur le thème pendant quelques minutes. L'animateur distribue une vingtaine de fiches (< 24), des post-it par exemple, mais de taille assez grande.

Chaque membre écrit ses observations sur les fiches avec des phrases :

– une phrase par fiche ;

– des phrases de moins de 15 mots.

On y indique :

– des faits précis ;

– des expériences ;

– pas de généralités, ni d'opinions.

On positionne les fiches, au fur et à mesure, à gauche du papier.

- **Phase 2 - Appropriation**

L'animateur lit l'énoncé de chaque fiche, son auteur l'explique et les participants modifient l'énoncé jusqu'à ce que sa signification soit devenue claire pour chacun.

- **Phase 3 - Regroupement**

Les participants regroupent les fiches par deux ou trois maximum, **par affinité**, en laissant sur le côté les « loups solitaires » (*Voir Figure 2.2*).

Il est possible d'ajouter quelques fiches si cela paraît souhaitable par le groupe.

- **Phase 4 - Titrage de premier niveau**

Les participants mettent un titre sur chaque groupe de fiches (*Voir Figure 2.3*).

THEME ....

Loup solitaire

Figure 2.2 Premier regroupement

THEME : ....

Titre N1 Titre N1 Titre N1 Titre N1 Titre N1

Titre N1 Titre N1 Titre N1

Loup solitaire

Figure 2.3 Titrage de premier niveau

Les titres sont indiqués sous forme de phrases. À ce stade, les idées, opinions et autres sont les bienvenues. Il s'agit d'un premier niveau d'abstraction. Les fiches de chaque groupe sont provisoirement empilées.

- **Phase 5 - Regroupement de deuxième niveau**

Les participants font un nouveau regroupement dit de deuxième niveau des groupes de niveau 1 et des loups solitaires.

Là encore les regroupements se font par ensembles de deux ou trois maximum.

- **Phase 6 - Titrage de deuxième niveau**

Les participants définissent un titre pour chaque groupe de deuxième niveau.

Les titres sont faits sous forme de phrases (*Voir Figure 2.4*). Il s'agit d'un deuxième niveau d'abstraction. Possibilité d'ajouter quelques fiches si cela paraît souhaitable.

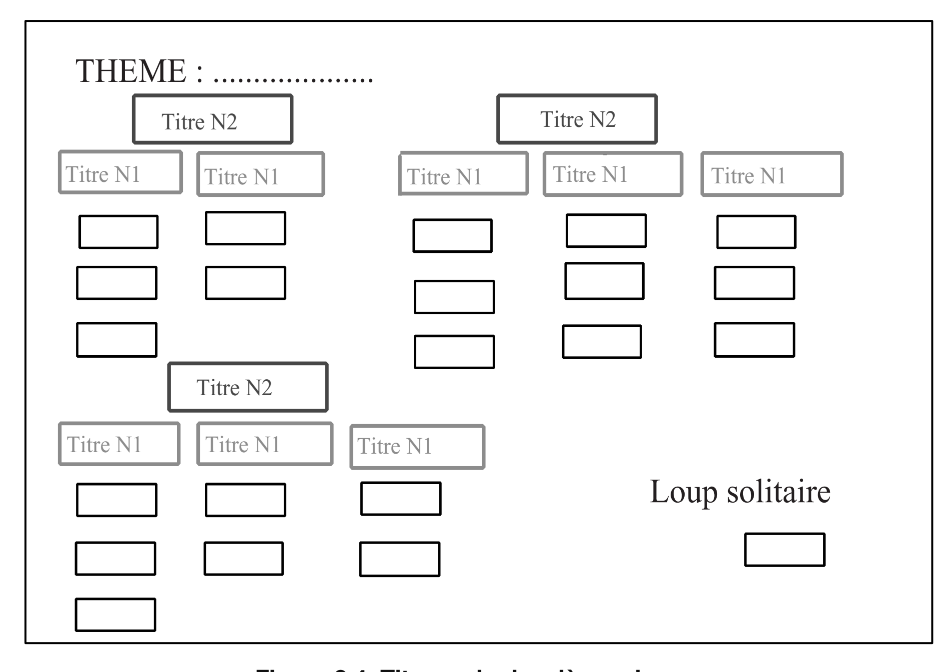
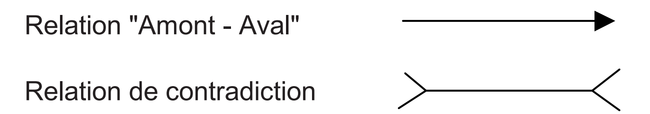


Figure 2.4 Titrage de deuxième niveau

● Phase 7 - Détermination des relations

Les participants vont établir les relations entre les différents groupes (1er et 2e niveau) :



Pour simplifier la représentation, il faudra repositionner les groupes de niveau un et deux.

● Phase 8 - Présentation définitive

Une présentation définitive est proposée en repositionnant les fiches et en dessinant des « courbes enveloppes » pour les niveaux un et deux.

● Phase 9 - Détermination des priorités

Chaque participant vote pour les groupes de premiers niveaux et les loups solitaires. Il choisit trois groupes en leur affectant des pondérations 1, 2, 3.

On écrit en haut et à droite du papier une phrase qui synthétise l'ensemble du travail. Il s'agit d'un troisième niveau d'abstraction.

Les choix sont faits et les décisions sont prises en fonction du résultat du vote :

– plans d'actions ;
– problèmes à traiter ;
– responsables ;
– moyens ;
– définition des ressources ;
– fixation des délais ;
– etc.

L'exemple suivant est simplifié pour des raisons de présentation (*Voir Figure 2.5*).

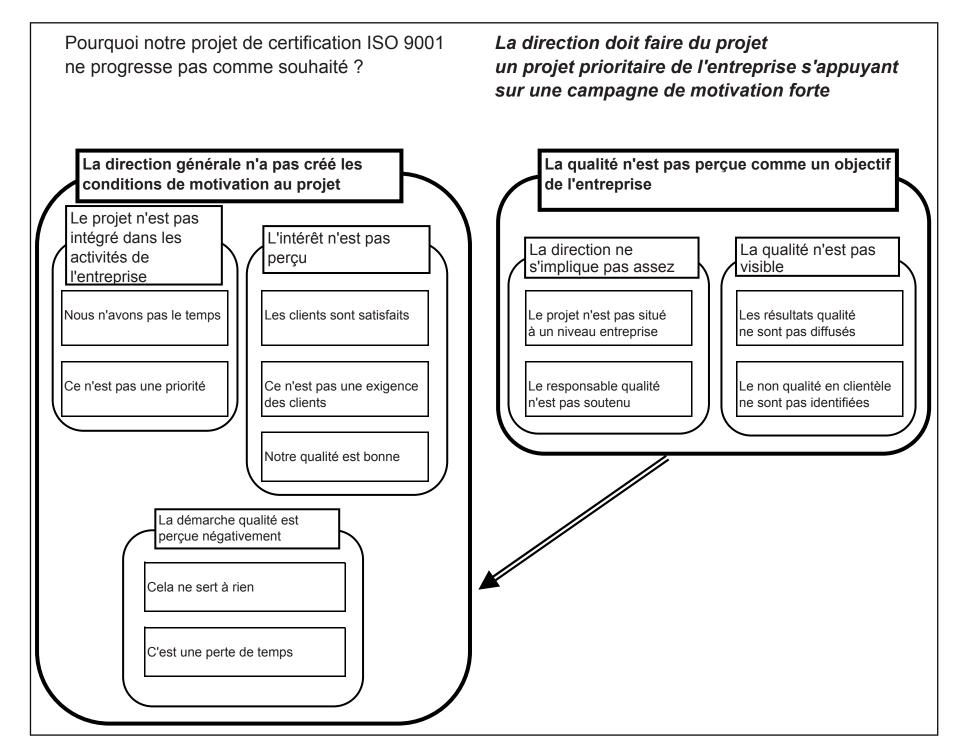


Figure 2.5 Exemple de diagramme des affinités KJ[4]

2.6 Méthode QQOQCP

2.6.1 But

Le QQOQCP (Qui, Quoi, Où, Quand, Comment, Pourquoi) est un moyen très simple pour analyser aussi complètement que possible un sujet donné ou remettre en cause une situation.

Par exemple :

- analyser une activité, un problème
- faire une recherche des causes d'un problème, de ses solutions
- préparer un plan d'action
- décrire une situation

4. Pour des raisons de présentation l'exemple est simplifié avec seulement 11 fiches au lieu de 20 à 24.

– rassembler des informations
– etc.

Il apparaît que le nombre de situations où cette méthode peut aider est très grand. Elle est également particulièrement bien adaptée au travail en groupe.

2.6.2 Déroulement

La méthode consiste à répondre systématiquement aux questions :

– QUI est concerné, responsable, avec quel niveau de formation ou de compétence, etc. (caractéristiques, nombre…) ?
– de QUOI s'agit-il, de quel(s) objet(s), de quelle(s) action(s), etc. (objet, nature, quantité, etc.) ?
– OÙ ? lieu, distance, etc. ?
– QUAND ? à quel moment, fréquence, combien de temps, etc. ?
– COMMENT réaliser ? (matériel, équipement, moyens nécessaires, etc.)
– POURQUOI réaliser une telle action, etc. ?

2.6.3 Remise en cause d'une situation

On peut utiliser le QQOQCP pour remettre en cause une situation en posant la question POURQUOI pour le QUI, le QUOI, le OÙ, le QUAND et le COMMENT.

2.6.4 Construction d'un document

Des documents peuvent être construits sur le principe du QQOQCP en considérant une partie seulement des thèmes.

Tableau 2.3 Tableau simplifié

QUOI	QUANQ	QUI	COMMENT

C'est ce que nous avons fait pour la rédaction des procédures.

2.7 Vote pondéré

2.7.1 But du vote pondéré

Il permet de prendre une décision en groupe lorsque l'on n'arrive pas naturellement à un consensus ou que le nombre de points sur lesquels porte le vote est grand. Le vote peut porter sur n'importe quelle proposition : une idée, une solution, une cause, etc.

C'est un processus de décision très efficace, préférable à un vote majoritaire ou à main levée. Il permet de prendre de bonnes décisions sur lesquelles il y a une bonne adhésion du groupe.

2.7.2 Déroulement

Face à un certain nombre de propositions parmi lesquelles il faut faire un choix, chacun va indiquer ses préférences en donnant respectivement :

- 3 points au premier choix ;
- 2 points au deuxième choix ;
- 1 point au troisième choix.

Il est possible de prendre un nombre de choix différent, 5 par exemple pour donner plus de rigueur au vote mais en général 3 est suffisant.

Le tableau 2.4 montre, sur un exemple de calcul, le principe du vote pondéré.

Tableau 2.4 Exemple de vote pondéré

N° personnes / Objet du vote	1	2	3	4	5	6	Total des points P	Nombre de votants N	Produit P×N	Classement
Proposition 1		1		3	3	1	8	4	32	2
Proposition 2	1	2	2				5	3	15	4
Proposition 3		3		2	2	2	9	4	36	1
Proposition 4	3						3	1	3	6
Proposition 5			3	1		3	7	3	21	3
Proposition 6	2						2	1	2	7
Proposition 7			1		1		2	2	4	5

La solution la plus simple est de se référer aux résultats de la colonne « Total des Points » pour faire le classement des réponses.

Mais il est préférable de faire le classement sur la colonne « Produit Points×Nombre de votants » pour la ligne considérée. Dans notre exemple, seul le rang des propositions 4 et 7 est inversé en fonction des deux méthodes.

Un intérêt complémentaire au classement sur la base du Produit P×N est que, le vote étant pratiqué en groupe, il y a un risque que certains participants modifient leur vote en fonction du vote des autres. Avec ce type de classement, cela devient beaucoup plus difficile.

2.7.3 Vote pondéré sur un diagramme causes effet

Les causes étant présentées sur le diagramme « Causes Effet » le vote pondéré s'applique parfaitement au choix des causes les plus probables selon l'expérience des participants. La méthode consiste alors à donner à chaque participant 3 gommettes de couleur différente pour distinguer le 1er, 2e et 3e choix. Les participants vont répartir tous en même temps leurs gommettes sur les causes de leur choix.

2.8 Matrice de compatibilité et critères de choix

2.8.1 But

Préparer la décision à l'occasion du choix :

- d'un problème à traiter ;
- d'une solution à envisager ;
- d'une action à entreprendre ;
- etc.

parmi plusieurs possibles.

Par exemple : une entreprise s'interroge sur la meilleure solution d'approvisionnement d'un produit stratégique :

- acheter en France,
- acheter à l'étranger,
- fabriquer elle-même,
- fabriquer partiellement.

Cette méthode est adaptée la prise de décision ou à sa préparation par un groupe.

Le choix est fait en fonction de critères à déterminer par le groupe.

2.8.2 Déroulement

- **Phase 1 - Définition du problème**

L'animateur énonce l'objectif avec un maximum de clarté.

Il formule clairement les éléments parmi lesquels il faut faire un choix.

- **Phase 2 - Définition des critères**

Le groupe définit au cours d'une séance de « remue-méninges » les critères de choix. Ceux-ci s'inspirent de considérations telles que : les contraintes imposées par le management ou l'environnement extérieur, les objectifs à atteindre, des fonctions à assurer, des considérations économiques, etc.

- **Phase 3 - Réalisation du tableau**

On remplit un tableau à double entrée :

– une colonne pour chaque critère de choix ;

– une ligne pour chaque élément du choix.

On distingue alors deux méthodes :

1-Matrice de compatibilité

Le groupe examine les compatibilités entre les « **éléments du choix** » et les « **critères** ».

On place :

– un signe « + » pour indiquer une compatibilité ;

– un signe « – » pour indiquer une incompatibilité ;

– un « ? » pour indiquer un avis favorable *a priori* mais méritant vérification ;

– rien s'il y a indépendance.

L'exemple du tableau 2.5 porte sur le choix d'un procédé de fabrication.

On choisit le procédé qui a le plus de signes + ; ici, ce serait le procédé B, sous réserve d'un complément d'informations sur le critère « expérimenté » des procédés A et D.

Tableau 2.5 Exemple de « Matrice de compatibilité »

Critères de choix / Éléments du choix	Compatible avec le budget	Mise en œuvre facile	Procédé expérimenté
Procédé A	+	–	?
Procédé B	+	+	–
Procédé C	–	–	+
Procédé D	–	+	?
Procédé E	+	–	–

2-Matrice des critères de choix

Cette méthode consiste à attribuer une note (1 à 3 par exemple) pour chacun des critères. Ceux-ci peuvent faire l'objet d'une pondération.

Tableau 2.6 Exemple de « Matrice de critères de choix »

Critères de choix / Éléments du choix	Efficace	Facile à réaliser	Écono-mique	Acceptable par tous	Totaux
Pondération	**3**	**1**	**2**	**2**	
Solution 1	3	1	3	3	22
Solution 2	2	2	2	1	14
Solution 3	2	2	3	1	16
Solution 4	2	1	2	1	13

Ce tableau est en faveur du choix de la solution 1.

Parfois, le choix d'une note est facilité par un vote, mais il faut favoriser l'obtention d'un consensus sur chacun des points à partir d'une discussion.

2.9 Présentation des résultats d'un groupe de travail

2.9.1 Objectif de la présentation

Dans la démarche de « résolution de problèmes récurrents en groupe de travail », la présentation des résultats par le groupe devant le management ou le comité

qui a posé le problème est une étape indispensable. Elle permet d'un point de vue pratique :

– au groupe de travail, de rendre compte de la mission confiée et de connaître la suite donnée à ses propositions ;
– au comité ou à la personne qui a confié la mission, d'officialiser ses décisions et de donner son avis sur la qualité du travail effectué (reconnaissance des mérites).

L'objectif est, pour le groupe, de convaincre. Pour cela il faut, non seulement que le groupe de travail présente ses conclusions, mais également qu'il explique comment il les a élaborées et donne les arguments justifiant ses propositions en mettant en valeur les « enjeux » (gains, avantages) relatifs aux propositions.

Il nous faut insister sur l'impact important que l'intérêt porté par la hiérarchie à la présentation aura sur la motivation des participants. *A contrario*, si le management ne valorise pas le travail effectué et ne tient aucun compte des propositions, cela entraînera pour l'avenir une démotivation catastrophique.

2.9.2 Gestion de la présentation

La présentation doit être soignée et préparée, pour cela le groupe doit :

– déterminer qui assure la présentation (l'animateur, un membre du groupe ou répartition de la présentation entre les membres du groupe) ;
– utiliser les moyens visuels : tableaux, photos, logiciel de présentation (type power point), etc. ;
– prévoir une séance de préparation de la présentation.

Il est indispensable que l'ensemble du groupe de travail assiste à la présentation.

2.9.3 Plan type de présentation des résultats d'un groupe de travail

Il s'inspire de la démarche de résolution des problèmes en groupe de travail. Le plan comprend :

– la composition du groupe de travail ;
– le rappel du problème ;
– les données et les méthodes d'analyse ;
– les moyens de suivi mis en place (indicateurs) ;

– les causes du problème et méthodes de recherche des causes ;
– les solutions envisagées ;
– les solutions retenues par le groupe et proposées ;
– la justification des solutions retenues (les enjeux) :
  - coût des solutions et gains attendus,
  - avantages et inconvénients ;
– le plan d'action proposé.

Les enjeux relatifs à une solution proposée peuvent être présentés sous la forme suivante (*Tableau 2.7*).

Tableau 2.7 Les enjeux

Négatif	Positif
Coût de la solution proposée	Gains financiers apportés par la solution
Inconvénients	Avantages

Les avantages et inconvénients ont souvent un caractère subjectif mais ce sont souvent eux qui permettent de trancher d'autant plus que les gains financiers sont souvent très difficiles à calculer.

2.9.4 Prise de décisions

Il est indispensable que les décisions prises par le management vis-à-vis des solutions proposées soient écrites dans un document officiel.

Ce document est établi après la présentation des conclusions du groupe de travail. Il est signé conjointement par l'animateur du groupe et par le président du comité qui a confié la mission.[5]

5. Parfois les décisions ne sont pas prises au cours de la réunion, mais il est indispensable de considérer l'impact très négatif des décisions trop différées et pire encore jamais prises.

Ce document peut être construit d'après le plan suivant :

– le rappel du problème posé ;
– les solutions proposées ;
– les enjeux (*rappel du tableau ci-dessus*) ;
– les décisions prises ;
– les responsables de la mise en œuvre des solutions retenues.

Partie II

La maîtrise des processus et méthodes ou techniques spécifiques

Processus :

– Achats/Approvisionnement
– Conception
– Production

3

La maîtrise du processus achats/approvisionnement

3.1 Domaine étudié et principes de base

3.1.1 Domaine étudié

Les produits ou services achetés seront gérés différemment selon leur nature. Nous adoptons le classement suivant qui ne prétend pas couvrir l'ensemble des possibilités (*Voir Tableau 3.1*).

Notre réflexion se concentrera sur les activités de production et de transformation et les produits fabriqués en série, mais la plupart des principes ou méthodes présentés sont transposables à tous les domaines d'activités y compris aux services.

L'achat peut avoir des degrés de complexité variable allant de l'achat du produit sur catalogue jusqu'à celui d'un produit conçu et fabriqué spécialement par le fournisseur en fonction des exigences du client. Ce dernier cas retiendra principalement notre attention.

Tableau 3.1 Activités concernées par les achats

Type d'achat	Activités concernées
Matières	Transformation et production
Analyse (physique, chimie…)	
Composants	Production
Prestations logistiques : transport, distribution…	Toutes activités
Informatique	
Travaux (ingénierie, bâtiment…)	
Prestation de service (formation, conseil…)	
Services généraux	

3.1.2 Enjeux de l'achat

L'achat a longtemps été négligé par les entreprises. Les chefs d'entreprise réalisent de plus en plus l'importance de l'enjeu. La valeur des achats d'une entreprise représente, selon le type d'entreprise, en moyenne plus de 60 % du chiffre d'affaires, atteignant parfois 70 % à 80 %. En conséquence, la qualité du produit fabriqué par une entreprise dépend, au même titre que le prix, en grande partie de la qualité des composants, matières, équipements de production achetés.

La non-qualité des composants ou matières achetés peut entraîner des coûts importants en retours, réclamations, produits perdus, arrêts de production, réparations en clientèle, etc. Ces coûts étant d'autant plus élevés que la manifestation du défaut se fait tard dans le cycle de vie du produit, par exemple un défaut sur un composant coûtera :

- 10 € s'il est détecté à la réception,
- 100 € s'il se manifeste en fin de production,
- 1 000 € s'il se manifeste chez le client final.

Parallèlement, l'acheteur sera d'autant plus mal informé de l'apparition d'un défaut et de ses conséquences que ce défaut se manifeste tard dans le cycle de vie du produit (*Voir Figure 3.1*). Cela pose le problème du circuit de remontée des informations relatif aux non-conformités d'autant plus difficile à traiter que l'entreprise est importante et complexe.

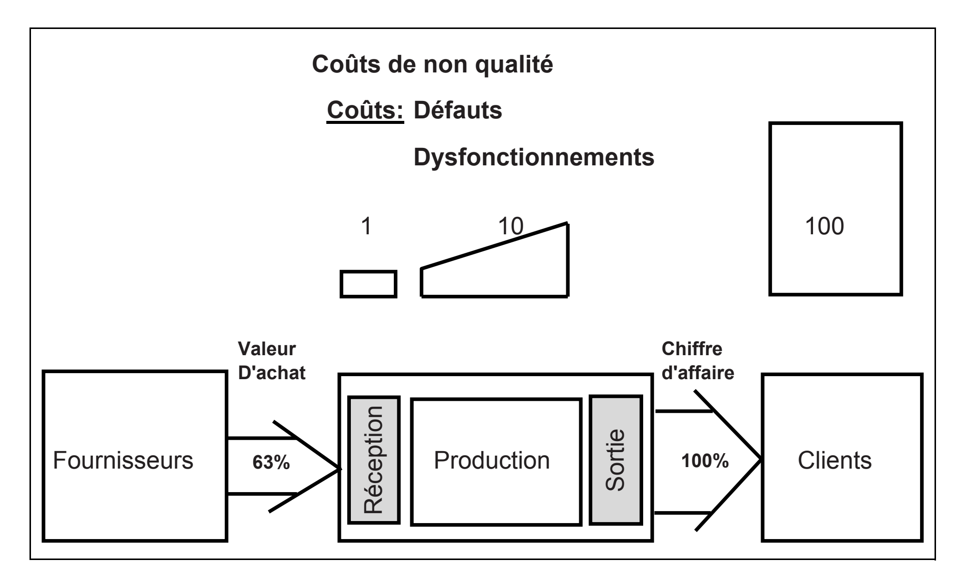


Figure 3.1 Coût d'un défaut

3.1.3 Produit acheté et services associés

Lorsque l'on prépare un acte d'achat, il faut considérer non seulement le produit mais également tout ce qui lui est associé, comme par exemple :

- son emballage, son conditionnement ;
- les aspects logistiques : mode de livraison, délais, quantités ;
- les documents tels que catalogue, documentations techniques, mode d'emploi, descriptifs, facturation, etc. ;
- les prestations accompagnant le produit tels que formation, informations, service après-vente, installation, assistance, etc.

Il faut prendre en compte toutes les caractéristiques du produit sans oublier les points tels que :

- les paramètres influant sur les coûts d'utilisation (maintenance, consommation, taux de pannes, durée de vie, destruction en fin de vie, etc.)
- les paramètres liés à son utilisation en production tels que la possibilité de montage automatique ou la simplicité d'utilisation à l'assemblage, par exemple.

3.1.4 Mission de l'achat et de l'approvisionnement

L'objectif des achats/approvisionnement est de mettre à disposition de l'entreprise les fournitures nécessaires à son activité et répondant à ses différents besoins. Cela doit se faire en optimisant les paramètres prix, qualité, délai, avec des fournisseurs auxquels on doit pouvoir se fier et ceci dans la durée.

La norme NF X 50 128 « Lignes directrices pour les achats et les approvisionnements » dont nous nous inspirons dans ce document, donne les Fonctions suivantes pour les différents acteurs :

> **§ 4**
> « En tant qu'acheteur, il convient de participer à la définition des fournitures et d'assurer :
> - la détermination de la stratégie de l'entreprise dans le marché fournisseur,
> - la préparation, la négociation, la conclusion et la gestion des contrats d'achats, commandes et marchés,
> - la surveillance du bon déroulement de ces contrats,
> - le règlement des litiges.
>
> En tant qu'approvisionneur, il convient d'assurer :
> - la programmation des besoins des livraisons et des stocks dans le cadre d'une planification générale de l'activité de l'entreprise,
> - la gestion matérielle et administrative des livraisons et des stocks de produits achetés.
>
> L'ensemble des deux fonctions forme la fonction achats/approvisionnements.
>
> Les achats/approvisionnements constituent l'un des sous-systèmes de l'entreprise. »

3.2 Management de la qualité aux Achats/Approvisionnement

Le management de la qualité à l'achat et à l'approvisionnement implique :

- de structurer les activités, ce que la norme ISO 9001 (2008) nous invite à faire selon l'approche processus ;
- d'écrire les procédures associées ;
- de manager le processus achats/approvisionnement dans une optique d'amélioration continue ;
- de mettre en œuvre la gestion des fournisseurs.

Nous allons développer ces thèmes.

3.2.1 La structure des activités de l'achat et de l'approvisionnement : la cartographie

Le processus d'achats et approvisionnement nous paraît d'une façon générale si important, pour une entreprise, qu'il va de soi qu'il doit être décrit, même si la norme ISO 9001 n'en fait pas une obligation formelle. Pour cela, nous utilisons la cartographie.

Un processus est formé d'« activités » apportant chacune une valeur ajoutée. Chaque case de cette cartographie correspond à une activité. Une flèche allant d'une activité à une autre indique le résultat du travail d'une activité (donnée de sortie), lequel sera nécessaire à l'activité suivante (donnée d'entrée).

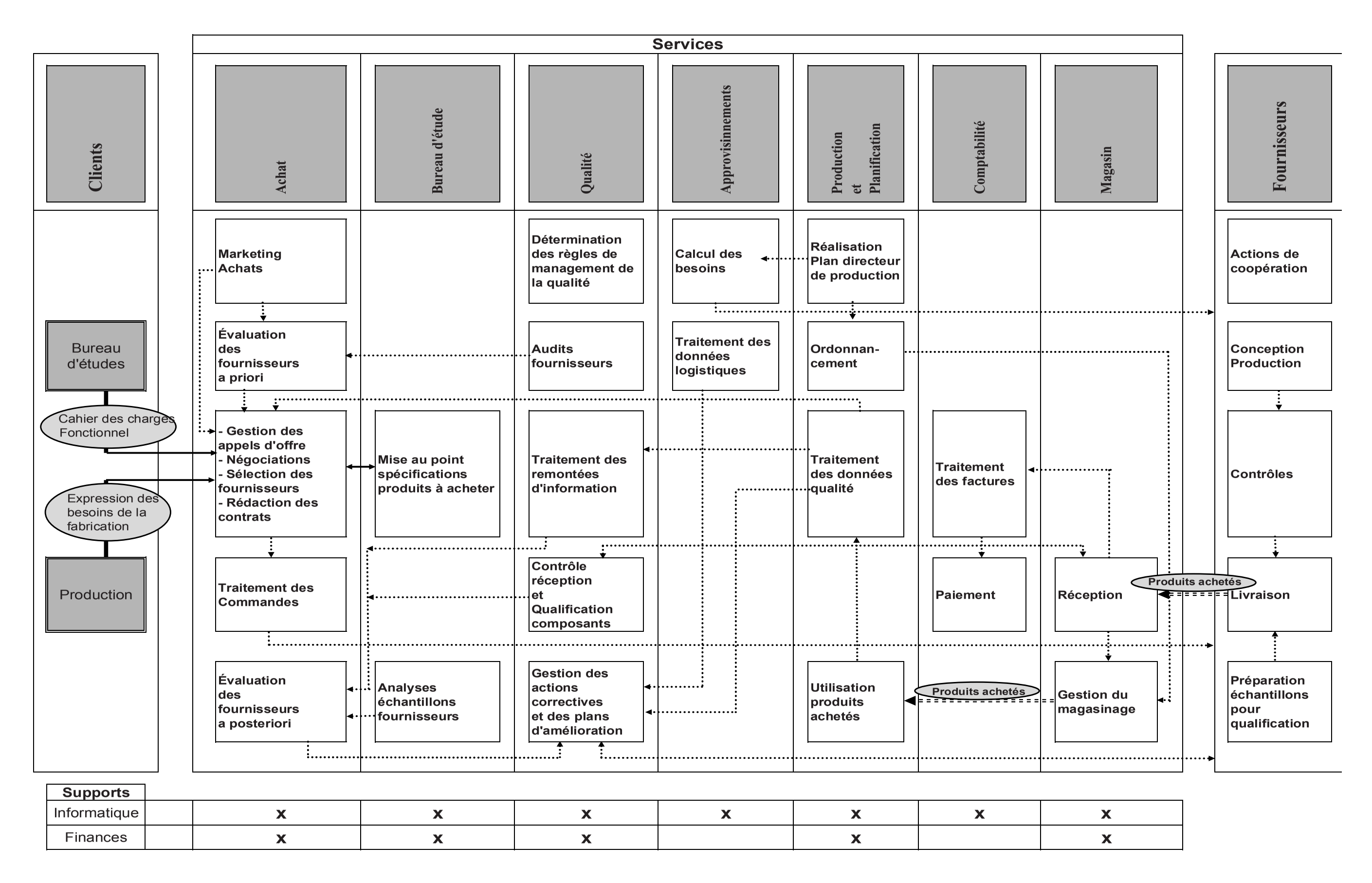
Nous proposons un exemple de cartographie pour une entreprise industrielle (*Voir Figure 3.2*).

Prenons l'exemple de l'activité « Gestion des actions correctives et des plans d'amélioration ». La cartographie montre que cette activité est sous la responsabilité du service qualité.

Examinons quelques flèches entrant ou sortant de cette activité (*Voir Tableau 3.2*).

Tableau 3.2 Analyse détaillée de la cartographie

Flèches en provenance de	Entrée ou sortie représentée
Traitement des données qualité	Problèmes qualité constatés en production ou points que la production souhaite voir améliorer. Ces données peuvent concerner les fournisseurs ou l'entreprise.
Traitement des données logistiques	Problèmes logistiques constatés sur les approvisionnements ou points que les approvisionnements souhaitent voir améliorer. Ces données peuvent concerner les fournisseurs ou l'entreprise.
Évaluation des fournisseurs *a posteriori*	Résultats des évaluations
Flèche bi-directionnelle reliant l'activité « Gestion des actions correctives et des plans d'amélioration » à « fournisseur ».	Ensemble des relations que le service qualité doit assurer avec les fournisseurs pour gérer les actions correctives ou les plans d'amélioration en relation avec les fournisseurs.



Supports	Achat	Bureau d'étude	Qualité	Approvisionnements	Production et Planification	Comptabilité	Magasin
Informatique	x	x	x	x	x	x	x
Finances	x	x	x		x		x

Figure 3.2 Cartographie du processus Achat et Approvisionnement

De plus, la croix dans la case « Finances » des services supports illustre que ce service doit fournir une assistance ; par exemple il doit mettre à disposition des données telles que les valeurs d'achats relatives aux fournisseurs.

Cette cartographie met bien en valeur :

– les différentes activités de l'achat/approvisionnement ;
– les services responsables ;
– les principales entrées et sorties ;
– les fonctions supports ayant à fournir une prestation dans le cadre de l'achat et de l'approvisionnement.

Elle montre également à l'évidence que beaucoup de services sont impliqués et qu'il en résulte un tissu de communication dense et ceci bien que, par souci de simplification, toutes les liaisons entre activités n'aient pas été représentées.

Toutes les informations résumées dans la cartographie doivent être détaillées dans des documents annexes. Par ailleurs, les modes de fonctionnement doivent faire l'objet de procédures.

3.2.2 Les procédures de l'achat

Dans le cadre de l'élaboration du système qualité de l'entreprise, le service Achats a intérêt à écrire des procédures concernant la relation avec les fournisseurs, mais également son fonctionnement interne.

Nous proposons à titre d'exemple la liste suivante :

– circuit de remontée des informations qualité ;
– évaluation des fournisseurs ;
– demande d'achat ;
– gestion des appels d'offres ;
– envoi de documents aux fournisseurs ;
– rédaction des contrats ;
– contrôle réception ;
– gestion des contrôles chez les fournisseurs ;
– facturation ;
– traitement des litiges.

3.3 Management du processus : déploiement des objectifs d'amélioration

Une fois les activités d'achats/approvisionnement bien structurées, il faut les manager dans une optique d'amélioration continue de la qualité telle que nous l'avons présentée initialement (*voir chapitre 1*). Nous nous limitons ici à traiter le cas du déploiement des objectifs de l'achat/approvisionnement sur les activités du processus.

L'outil proposé permet d'établir les objectifs et de vérifier que ceux fixés à un certain niveau sont en adéquation avec ceux du niveau supérieur (*Voir Tableau 3.3*) conformément à ce qui a été présenté au paragraphe 1.6.3.

À un objectif doivent être associés un ou plusieurs indicateurs qui en permettent la mesure.

On évalue par une note allant de 1 à 10, par exemple, dans quelle mesure l'objectif de l'activité va dans le sens de l'objectif du niveau supérieur (c'est-à-dire ici de l'ensemble du processus achats/approvisionnement, lui-même devant être en cohérence avec ceux de l'entreprise), le total par objectif permet de faire un choix en mettant la priorité sur les objectifs correspondant le mieux aux objectifs de rang supérieur.[1] Le total par colonne permet d'apprécier dans quelle mesure les objectifs de la conception sont pris en compte.

3.4 Acheter, un problème de relations

Nous voulons mettre en exergue quatre types de relations essentielles.

3.4.1 Relation avec les fournisseurs

Pour une entreprise, la qualité des produits dépend avant tout de la façon dont ils ont été conçus et de la qualité des composants et matières provenant des fournisseurs. Cela met en évidence :

- l'importance d'une relation étroite entre l'entreprise et ses fournisseurs ;
- la nécessité d'un travail en commun entre le service achat et le service conception.

1. Dans la description de la méthode au paragraphe 1.6.3, nous avions rajouté les deux critères « Menaces, Opportunité » et « Forces et Faiblesses » que nous n'avons pas repris ici.

Tableau 3.3 Déploiement des objectifs

Tableau de déploiement des objectifs

Objectifs du processus achat

5

4 Accroître les gains obtenus par négociation

3 Réduire le nombre de références achetés

2 augmenter la proportion de fournisseurs classés A

1 Augmenter le nombre d'opérations de partenariat

Activité	Objectifs	1	2	3	4	5	Total	INDICATEUR	PLAN D'ACTION
		EFFICACITÉ (Corrélation avec les objectifs supérieurs)							
Évaluation des fournisseurs	Augmenter le nombre d'évaluations	3	6	0	0		9		
Évaluation des fournisseurs	Améliorer la qualité des évaluations	0	2	0	0		2		
							0		
Traitement des commandes	Réduire le temps de traitement des commandes	0	0	0	0		0		
POIDS TOTAL		3	8	0	0	0	11		

Il faut développer fortement la relation avec les fournisseurs car une coopération étroite avec eux est le meilleur moyen d'obtenir des produits correspondant aux besoins, de découvrir ensemble les solutions les mieux adaptées pour améliorer les produits et résoudre les problèmes de transport, approvisionnement, emballage, manutention en production… Un fournisseur bien informé de nos exigences et de nos problèmes peut devenir une force de proposition dans l'intérêt commun.

La norme ISO 9004 insiste beaucoup sur cette relation dans le paragraphe 6.6 Fournisseurs et partenariats.

3.4.2 Relation entre achat et conception

Nous insistons sur la relation privilégiée qu'il doit y avoir entre le service achat et les services directement attachés à la conception et ceci le plus en amont possible dans le processus de conception. L'acheteur doit apporter une aide importante aux concepteurs pour découvrir les fournisseurs répondant le mieux aux besoins et négocier au mieux les conditions. Le marketing achat, qui consiste à prospecter en permanence le marché pour découvrir de nouveaux produits et de nouveaux fournisseurs dans les domaines spécifiques de l'entreprise, est une aide précieuse pour les activités de conception.

3.4.3 Relation entre approvisionnement et production

De même il doit y avoir une relation très forte entre ces deux services, de telle sorte que les besoins de la fabrication soient pris en compte.

3.4.4 Relations entre l'achat et les autres prescripteurs

Bien sûr, l'achat va également concerner tous les services de l'entreprise sous forme d'achats généraux qu'il ne s'agit pas de négliger. Mais cette relation est nécessairement plus diluée et peut difficilement être aussi structurée que les précédentes.

3.5 Gestion des fournisseurs

3.5.1 Bien gérer les achats dans un esprit de collaboration

L'importance des fournisseurs vis-à-vis de l'entreprise nous conduit à aller vers une politique de collaboration forte avec les fournisseurs. Cela demande des ressources et beaucoup de travail.

Pour cela, nous proposons quelques axes susceptibles d'optimiser les ressources.

3.5.2 Limiter le nombre de fournisseurs

Plus le nombre de fournisseurs est important, plus il est difficile d'avoir une relation approfondie avec eux et donc de créer des liens de coopération, et plus la gestion de la qualité demande des ressources importantes.

La plupart des entreprises ont adopté des plans de réduction du nombre de fournisseurs. Cela ne veut pas dire qu'il faut éliminer toute possibilité d'intégrer de nouveaux fournisseurs ; cela est même nécessaire pour favoriser l'innovation. Mais cela doit se faire à travers une sélection rigoureuse de ces fournisseurs sur la base d'un système d'évaluation que l'on présentera ultérieurement.

3.5.3 Adopter le « multisource »

● **Principe du multisource**

Le multisource consiste à avoir plusieurs fournisseurs (deux ou trois, parfois plus) pour un même produit acheté.

Il est communément admis qu'il faut avoir plusieurs sources d'approvisionnement pour garantir ce dernier, car une rupture d'approvisionnement peut mettre une entreprise en grande difficulté.

Cette proposition va à l'encontre de la précédente, mais autant il est utile de limiter le nombre de fournisseurs, autant il est bon de disposer de plusieurs fournisseurs pour un même composant ou une même matière.

Mais cela n'est pas si simple. Le multisource présente des avantages mais également des inconvénients, si l'on considère les aspects qualité, logistique et prix. Nous allons examiner les différents points à considérer avant de décider de mettre un approvisionnement en multisource et voir les solutions alternatives au multisource.

● **Avantages du multisource**

Ils peuvent être importants. Cela peut être :

– Des possibilités de dépannage ou une limitation des risques en cas d'incapacité d'un fournisseur à livrer. Cela est même sa raison première.
– La mise en concurrence des fournisseurs. Il est difficile de faire évoluer un fournisseur en position de monopole sur les différents plans : qualité, prix et logistique. Il faut au minimum qu'il sache qu'il pourrait perdre un marché s'il n'accepte pas de procéder à des améliorations sur ces trois plans.

● Conditions d'application

Il est bien évident que la pratique du multisource dépend beaucoup de l'activité de l'entreprise et des produits achetés.

Un fabricant de produits qui est engagé à livrer à des dates précises des quantités de produits bien déterminées, ne peut pas se permettre d'être en retard et doit donc, entre autres, avoir confiance dans ses propres approvisionnements.

Cette confiance dépend elle-même de la nature des produits achetés et du marché. L'achat d'un composant simple, banal, très répandu sur le marché, ne présentera aucun intérêt à être en multisource. Alors que l'achat d'un produit complexe, difficile à fabriquer et peu répandu sur le marché devrait être en multisource. Parfois, il n'existe pas deux sources potentielles sur le marché et cela nécessitera d'être traité d'une façon particulière avec le fournisseur comme on le verra plus loin (*Voir paragraphe 3.5.4*).

Une production de petite série de produits est difficilement compatible avec un approvisionnement en multisource.

● Inconvénient du multisource

Il peut y avoir des inconvénients au multisource. Le choix d'avoir plusieurs sources pour une même fourniture entraîne automatiquement un plus grand nombre de fournisseurs à gérer, ce qui peut impliquer des frais et des charges supplémentaires, notamment dans les quatre domaines d'activité suivants :

– **Logistique** : le multisource va alourdir la planification des approvisionnements et la gestion des magasins, accroître les stocks, créer des difficultés de traçabilité… Les systèmes de GPAO (Gestion de production assistée par ordinateur) ou ERP (*Enterprise Resource Planning*) sont parfois assez mal adaptés à ce type de gestion.
– **Qualité** : le multisource va augmenter le travail d'évaluation des fournisseurs et de qualification de leurs produits, de suivi qualité, de gestion des plans d'amélioration des fournisseurs, etc. Bien sûr, cela dépend de l'impact sur la qualité du produit fini. Un composant simple ne posant pas de problème qualité n'impliquera aucune charge supplémentaire sur le plan qualité.
– **Achat** : le multisource va nécessairement augmenter le travail des acheteurs (relation, négociations, etc.).
– **Coûts supplémentaires** : les coûts des fournisseurs augmentent, puisqu'ils doivent amortir leurs frais (investissements, outillage, qualification, etc.) sur des séries plus petites.

Par ailleurs, en cas d'incapacité d'un fournisseur à livrer, il n'est pas sûr que le ou les autres fournisseurs aient des capacités de production permettant de prendre la relève d'une part et de réagir dans des délais satisfaisants d'autre part.

● **Gestion des multisources**

Lorsque le choix d'un multisource est fait sur un produit acheté il faut alors traiter les deux points suivants :

– Comment répartir les quantités sur les différents fournisseurs ? Celles-ci peuvent être équilibrées ou bien un fournisseur peut être largement majoritaire, l'autre (ou les autres) source(s) n'étant activée(s) que sur des quantités réduites. Il faut s'assurer que cette source aurait des capacités suffisantes pour livrer en quantité suffisante en cas de défaillance du fournisseur principal.
– Comment approvisionner ? Les différentes sources livrent en même temps ou les unes après les autres selon une périodicité à déterminer, par exemple mensuelle.

● **Compromis**

Le multisource est un choix qui relève d'un compromis entre les avantages et les inconvénients. Le tableau 3.4 apporte une aide à cette réflexion. Il faut passer en revue tous les composants d'un produit et prendre la décision d'une ou plusieurs sources sur chacun de ses composants en passant en revue les points précédents. Nous proposons pour cela l'outil d'aide à la décision basé sur l'analyse des « Menace, Opportunité, Force et Faiblesse ».

Une analyse subjective des réponses à l'ensemble de ces questions peut suffire à la prise de décision.

Il est possible de lui donner un caractère plus objectif avec une méthode de calcul des critères de type AMDEC, conformément au tableau 3.5. Nous proposons de baser la décision sur le résultat obtenu M.

$M = (C \times F)/(O \times f)$

chacun des critères faisant l'objet d'une notation (*voir tableau 3.5*).

Les notes à attribuer peuvent faire l'objet de pondération en fonction des priorités ou des politiques de l'entreprise, par exemple une entreprise préoccupée de mettre en concurrence ses fournisseurs pourra donner un poids plus grand à ce critère.

Un seuil est fixé au résultat M à partir duquel il est décidé de prévoir au moins une autre source d'approvisionnement, par exemple M = 5.

Tableau 3.4 Analyse « Menace, Opportunité, Force et Faiblesse »

Menace : Risques de rupture d'approvisionnement Il s'agit d'apprécier la « Criticité » du risque à partir de deux critères en s'inspirant de l'AMDEC[2]. La criticité est fonction de : – La gravité : importance des conséquences d'une rupture d'approvisionnement (pertes de marché, pénalités, image de marque…) – La probabilité d'occurrence d'une rupture d'approvisionnement La gravité est associée au produit fini.	**Opportunité :** Disponibilité du produit acheté sur le marché (possibilité de trouver rapidement une source alternative en cas de rupture) On s'appuie sur deux critères relatifs au produit acheté : – Produit simple, standard – Produit largement répandu (nombreux fournisseurs)
Force : Intérêt de mettre en concurrence les fournisseurs sur les plans : prix, qualité, et/ou logistique.	**Faiblesse :** Augmentation des charges et des coûts. L'analyse porte sur : – Risque d'augmentation du prix d'achat (amortissements des frais du fournisseur qu'impliqueraient des séries réduites) – Charges supplémentaires pour l'entreprise sur les plans : Qualité, logistiques, achats.

3.5.4 Sécuriser

Si le choix du multisource s'avère difficile voire impossible sur des produits achetés présentant un risque de rupture d'approvisionnement, une solution peut être de sécuriser cet approvisionnement en exigeant de ces fournisseurs la mise en place de solutions permettant d'assurer la production et la livraison.

Par exemple :

– Faire une étude approfondie des risques d'arrêt de production (AMDEC processus) et mettre en place des solutions permettant de réduire ces risques ;

– Établir un plan de gestion des multisources (du fournisseur) ;

– Déposer un double des outillages chez un concurrent ;

2. AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et de leur Criticité. Nous traitons ce sujet au chapitre 12.

– Prévoir des stocks de sécurité ;
– Confier une partie de sa production à un sous-traitant ;
– Prévoir des surcapacités, dupliquer les installations les plus critiques ;
– etc.

Tableau 3.5 Calcul des critères de prise de décision « multisource » : M = (C × F) / (O × f)

		G	P	C	O	F	f	
		Gravité	Probabilité d'occurrence	Criticité = G×P	Opportunité	Force	Faiblesse	M
Notation		**1 à 5**	**1 à 5**	**1 à 25**	**1 à 5**	**1 à 5**	**1 à 5**	
Produit	**Code**							
Moteur	xxx	4	4	16	2	3	4	**6**
Résistance électronique	yyy	4	1	4	5	1	1	**0,8**
Sous-ensemble spécifique	zzz	4	3	12	1	5	5	**12**

3.5.5 Limiter le nombre de composants

Le service achat d'une entreprise industrielle qui conçoit ses produits est, d'une façon très générale, confronté au problème du nombre de composants de plus en plus important. Le choix des composants par les concepteurs se fait souvent en fonction de considérations immédiates :

– le résultat d'un calcul ;
– le composant disponible dans le bureau d'étude ;
– le composant proposé comme échantillon par un fournisseur ;
– etc.

Il en résulte une multiplication du nombre de références dans les nomenclatures de produits. Or, chaque référence ajoutée dans la base de données est

une source de frais et une charge pour la gestion de la qualité : frais d'achat, frais d'approvisionnement, impact sur le coût des stocks et du magasinage… Il est donc utile de mettre au point des procédures permettant de limiter cette multiplication des codes. Nous proposons plusieurs méthodes permettant de limiter cette inflation du nombre de composants.

● Gestion d'une liste préférentielle

Établir une liste préférentielle de composants dans laquelle est sélectionné un nombre aussi limité que possible de composants, de préférence normalisés (niveau international ou national).

Par exemple :

– pour des résistances électriques : choix d'un nombre limité de familles et limitation du nombre de valeurs dans chaque famille ;

– pour la visserie : choix d'un nombre réduit de types et, parmi ces types, limitation au maximum du nombre de dimensions autorisées.

Les concepteurs doivent en priorité choisir des composants dans cette liste. La priorité est donnée aux composants ayant fait l'objet d'une qualification interne par le service qualité ou ayant une bonne réputation de qualité. Le tableau 3.6 donne un exemple de liste préférentielle.

Tableau 3.6 Liste préférentielle des produits achetés

Produit acheté	Réf. produit	Four-nisseur	Qualification entreprise (Catégorie)	Certification système fournisseur	Certification produit fournisseur
Microprocesseur	X111	Dupond	A	ISO 9001	non
Contacteur	Y112	Martin	B	ISO TS 16949	Sécurité
Boîtier	Z222	Durand	C	non	NA
Lampe	Z123	Henri	B	ISO 14001	non

La gestion de la liste nécessite une procédure stricte exigeant :

– d'autoriser l'utilisation d'un composant hors liste uniquement après justification ;

– de tenir à jour les taux d'utilisation des composants dans la base de données composants afin d'éliminer, si possible, les composants à faible taux d'emploi.

L'application d'une telle procédure exige une discipline très stricte dans l'entreprise.

- **Analyse systématique en cours de conception**

Une autre façon de limiter le nombre de composants est de faire systématiquement pour chaque nouveau produit au cours de la conception une analyse critique systématique du nombre de composants intervenant notamment dans les systèmes mécaniques. Bien souvent, ces systèmes mécaniques pourraient être simplifiés. Il existe des méthodes pour cela. Notamment l'analyse de la valeur sur des sous-ensembles mécaniques peut être utile. Cela peut se faire à un stade bien identifié de la conception dans le cadre des revues de conception.

- **Adoption d'une politique de standardisation**

Une autre façon de limiter le nombre de composant est d'adopter une politique de standardisation. Il s'agit de réaliser au maximum des sous-ensembles communs à différents produits.

3.5.6 Définir les exigences relatives aux produits achetés

- **Les exigences**

La base d'une relation contractuelle entre un client et un fournisseur repose sur un accord sur les exigences concernant les composants ou matières faisant l'objet de la transaction commerciale. Ces exigences concernent :

- la qualité du produit et du service ;
- la logistique (quantité, délai) ;
- les prix et les coûts ;

en notant que ces trois paramètres sont tout à fait interdépendants.

- **Les spécifications du produit**

Nous traitons de ce sujet au paragraphe « définition du produit » du chapitre 12.

Rappelons seulement ici quelques points essentiels :

- Réaliser, chaque fois que cela est possible, un **Cahier des charges fonctionnel**, d'où découlera une **spécification technique** selon la démarche de l'analyse fonctionnelle. Cela permet de coller au plus près du besoin et de ne pas enfermer le fournisseur dans des solutions techniques au détriment de

solutions innovantes et économiques. Cela suppose que le choix du fournisseur soit fait très en amont, chose impossible dans le cas d'appel d'offres.

– Ne pas oublier, comme cela est souvent le cas, le thème de la sûreté de fonctionnement si souvent négligé.
– Prendre en compte que le produit doit être pris au sens très général. Il comprend le produit lui-même, son emballage, son marquage, son conditionnement ainsi que toutes les prestations associées (une formation à l'utilisation du produit, une prestation de service après vente, une aide à l'entretien du produit, un mode d'emploi…).

● **Les spécifications logistiques**

Elles comprennent :

– les quantités à livrer ;
– le délai de livraison ;
– le temps de réaction pour une nouvelle commande[3] ;
– l'unité de livraison ;
– le conditionnement ;
– le mode de livraison (moyen de transport, conditions de manipulation, précautions à prendre) ;
– l'adresse de livraison ;
– les horaires de livraison.

● **Le « juste à temps » dans la relation client fournisseur**

De plus en plus, le concept de « juste à temps » s'impose dans l'approvisionnement des produits achetés. Son principe consiste à limiter les stocks au maximum en achetant ou produisant seulement ce dont on a besoin, quand on en a besoin. Cela suppose une façon de produire et une relation client-fournisseur fondamentalement différentes. Mais, au-delà de la réduction des stocks, l'intérêt essentiel du juste à temps est de permettre une grande réactivité en cas de problèmes qualité ou de nécessité de modifier le produit pour mieux répondre au besoin des clients.

---

3. Cette caractéristique logistique peut être une des plus délicates à définir voire à négocier. Il s'agit de distinguer les commandes régulières lorsque le fabriquant produit d'une façon régulière, du cas où, la production étant arrêtée, il faut un délai pour la relancer.

Sur le plan pratique, le juste à temps se traduit par des exigences très fortes vis-à-vis des fournisseurs concernés[4]. Pour y répondre, ces derniers doivent s'engager à :

– faire un travail en profondeur pour assurer une très bonne fiabilité de leurs moyens de production (une panne entraînant quasiment automatiquement une rupture d'approvisionnement) ;
– atteindre une très grande maîtrise de la qualité de la production, avec des taux de défauts acceptables très faibles (un lot présentant un défaut entraîne une rupture d'approvisionnement) ;
– livrer en petits lots, ce qui implique de fabriquer par petites quantités en écartant toute idée de quantité économique ;
– assurer un petit stock de sécurité chez eux pour pallier une défaillance éventuelle ;
– livrer avec des conditionnements permettant l'utilisation directe des composants dans les ateliers du client ;
– parfois livrer directement aux postes de travail de l'atelier du client ; cela peut impliquer une implantation près du client.

Le juste à temps se traduit pratiquement pour le client par la suppression du contrôle réception.

● Les prix

Les prix doivent comprendre les différents aspects : prix d'achat, frais de transport, conditions de garantie, traitement des frais consécutifs à de mauvais composants…

Il faut tenir compte dans les négociations du « coût de possession », c'est-à-dire de prendre en considération tous les coûts liés à l'utilisation du produit.

● L'adéquation des exigences

Le paragraphe 7.4.2 de l'ISO 9001 se termine par :

> **NF EN ISO 9001 (2008)**
>
> **§ 7.4.2 Informations relatives aux achats**
>
> « (…) L'organisme doit assurer l'adéquation des exigences d'achat spécifiées avant de les communiquer au fournisseur. »

---

4. Nous insistons sur ce point car le Juste à Temps est souvent perçu exclusivement sous l'angle d'une simple réduction des stocks.

Nous relevons ce point spécifique qui peut paraître anodin à la lecture de la norme mais qui recouvre en pratique une action très importante. Concrètement, cela signifie que l'entreprise doit confier à une entité la mission de s'assurer que les spécifications émanant d'un demandeur sont réalistes. Par exemple, un concepteur d'un produit peut souhaiter commander un composant d'un niveau de qualité supérieur au juste nécessaire. Cela pose le problème des personnes capables de juger de l'adéquation. Bien sûr les concepteurs ou plus généralement, les prescripteurs, doivent être sensibilisés à ce problème. Mais à notre avis l'acheteur doit jouer un rôle essentiel dans ce domaine. Dans une conception moderne, le rôle de l'acheteur ne se limite pas à la passation des commandes, mais consiste à exercer un jugement critique sur les exigences. L'acheteur, qui n'a pas forcément la connaissance technique sur les produits, doit pourtant être en mesure, par exemple, de :

- mettre en évidence les conséquences économiques de certaines exigences ;
- s'assurer que les spécifications sont claires et complètes ;
- promouvoir des méthodes telles que l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur qui sont susceptibles d'apporter beaucoup dans ce domaine ;
- favoriser les contacts avec les fournisseurs pour trouver des compromis qualité/prix sur les exigences.

3.5.7 Construire un contrat avec un fournisseur

Nous venons d'examiner certains points relatifs aux exigences vis-à-vis du fournisseur présentant, de notre point de vue, quelques difficultés. Tout cela doit contribuer à la rédaction du contrat avec le fournisseur. En considérant le cas d'un produit industriel complexe, nous proposons le contenu d'un contrat aussi exhaustif que possible sachant que, dans la pratique, tous les points présentés ne sont pas forcément nécessaires à décrire.

● Les clauses techniques

Description des caractéristiques initiales du produit (ou 0 heure)

La description des caractéristiques mesurables et/ou par attribut (par bon mauvais) :

- Les méthodes de mesure des caractéristiques ou d'observation pour les caractéristiques par attribut.
- L'importance des caractéristiques.

– Taux de défauts acceptables et Indices de capabilité.

Exigences relatives à la sûreté de fonctionnement

– La fiabilité (taux de défaillances acceptables, aptitude à résister à des tests, conditions d'utilisation).
– La sécurité.
– La maintenabilité (conditions d'entretien et réparation).
– La disponibilité.
– L'invulnérabilité (aptitude à résister aux agressions malveillantes).

Les prestations associées

Exemples :

– Une formation à l'utilisation du produit.
– Une prestation de service après vente.
– Une aide à l'entretien du produit.
– Une documentation technique.
– Un mode d'emploi.

● **Les clauses d'assurance de la qualité**

– Système d'assurance de la qualité.
– Certifications exigées (Système d'assurance qualité, Environnement, Sécurité, Service, produit, personnes…).
– Contrôles du produit (qualification, réception, contrôle fournisseur).
– Gestion de la qualité en conception et développement par le fournisseur.
– Gestion de la qualité en production par le fournisseur.

● **Les clauses environnementales**

Exemples :

– Respect des réglementations spécifiques au produit concerné.
– Limite acceptable pour des impuretés dans un matériau.
– Produits interdits.
– Demande d'un rapport d'impact environnemental.

- **Les clauses sur la gestion des relations**

Exemples :

– Établissement en commun des spécifications.
– Les actions correctives en cas d'anomalies.
– Le règlement des litiges.
– Les demandes de dérogation ou de modifications.

- **Les clauses logistiques**

Exemples :

– Respect des délais.
– Temps de réaction à une nouvelle commande.
– Capacités à mettre en place.
– Conditions de transport.
– Unité de livraison.
– Le conditionnement.
– Le mode de livraison (moyen de transport, conditions de manipulation, précautions à prendre).
– Conditions de livraison (adresse, horaires, quantités…).
– Livraison dans des conditions d'un « Juste à Temps ».
– Informations à communiquer.

- **Les clauses juridiques**

Exemples :

– Conditions de résiliation du contrat.
– Clauses de confidentialités.
– Droit de propriété.
– Brevets.

- **Les clauses financières**

Exemples :

– Prix du produit et des prestations.
– Prix des composants à fournir éventuellement en service après vente.

– Conditions de paiement.
– Pénalités suite à : non conformités, retard dans la conception, retard de livraison…
– Conditions de garanties.

3.6 Obtenir confiance en son fournisseur

3.6.1 Choix d'une solution

Pour un acheteur, le premier point à traiter dans la relation client-fournisseur est d'acquérir confiance en son fournisseur. Il existe pour cela différentes approches plus ou moins adaptées, qu'il faut choisir en fonction de la criticité des produits achetés et de leur nature (produits achetés sur catalogue, produits avec des spécifications propres au client, produits simples ou complexes…). Nous allons développer les différentes méthodes possibles.

3.6.2 Certification : un gage de confiance

S'appuyer sur les certifications du fournisseur est certainement un moyen efficace pour le client d'asseoir sa confiance et de s'assurer de ses compétences. C'est pour l'acheteur le moyen le plus économique, mais le domaine traité par la ou les certifications ne couvre pas nécessairement l'ensemble des compétences recherchées.

Le système de certification offre de sérieuses garanties. La certification est réalisée par un organisme tiers, neutre et indépendant. Cet organisme certificateur est soumis à une déclaration d'activité officielle auprès du ministère chargé de la consommation, de l'environnement et de l'industrie suivant les cas. Il peut également se faire accréditer, ce qui donne encore plus de sérieux au dispositif. En France, l'organisme habilité à accréditer les organismes certificateurs est le COFRAC, sous l'autorité du ministère de l'industrie et du commerce. L'organisme certificateur réalise ou fait réaliser un audit ou des contrôles permettant de démontrer que le fournisseur respecte bien une norme de référence.

La certification repose sur un référentiel qui doit comprendre les normes et spécifications à respecter, les méthodes pour vérifier la conformité et éventuellement les moyens à mettre en œuvre par le fournisseur pour que le produit ou le service présente les caractéristiques définies.

Il existe différents types de certifications. Celles qui nous sont les plus utiles dans les relations clients-fournisseurs sont :

– la certification de système qualité ;
– la certification du respect de l'environnement ;
– la certification du respect de la sécurité ;
– la certification de produits ou services ;
– l'accréditation des laboratoires ou organismes d'essais et des laboratoires d'étalonnage.

● **Certification de système qualité**

Le référentiel le plus communément utilisé actuellement est la norme NF EN ISO 9001:2008. D'autres normes existent et sont, en général, spécifiques à une profession : automobile (ISO 16949), aéronautique (AQAP110), etc. La certification d'un système qualité ne garantit pas la qualité des produits ou services. Un bon système qualité est une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour réaliser de bons produits ou services Elle prouve que l'entreprise certifiée :

– a mis en place **une organisation** respectant tous les principes nécessaires à la réalisation de bons produits ou services, sans toutefois garantir la qualité des produits ou services ;
– dispose des **ressources suffisantes** dans la gestion de son système qualité ;
– a adopté une démarche **d'amélioration continue**.

L'acheteur qui fait appel à un fournisseur certifié doit toutefois s'assurer que le produit qu'il lui achète est réalisé dans un secteur du fournisseur qui a réellement été certifié. En effet, le champ ou le périmètre couvert par une certification de système qualité peut être partiel.

● **Certification du respect de l'environnement**

Il s'agit également d'une certification de système. Le référentiel le plus communément utilisé actuellement est la norme NF EN ISO 14001. Elle prouve que l'entreprise certifiée a mis en place une organisation respectant tous les principes nécessaires au respect de l'environnement.

● **Certification de produits ou de services**

On distingue les produits industriels, agroalimentaires et les services. La certification a pour but d'attester, au moyen d'un « certificat de qualification »

délivré par un organisme tiers et indépendant, qu'un produit industriel, un bien d'équipement, un service ou un produit agroalimentaire est conforme à des normes ou à des spécifications déterminées, chacun de ces domaines ayant ses spécificités. Tous les produits ou services ne font pas l'objet d'une norme ou d'une spécification.

Son objectif est de fournir aux entreprises le souhaitant un support d'évaluation et de certification de leur système de management de la santé et de la sécurité au travail, compatibles avec les autres référentiels internationaux de système de management.

- **Certification du respect de la sécurité**

Il s'agit de certifier qu'une entreprise a un bon management de la sécurité, de la santé et de la sécurité au travail.

Le référentiel le plus utilisé actuellement est l'OHSAS 18001 dont la structure est similaire à l'ISO 14001.[5]

- **Certification de produits ou de services**

On distingue les produits industriels, agroalimentaires et les services. La certification a pour but d'attester, au moyen d'un « certificat de qualification » délivré par un organisme tiers et indépendant, qu'un produit industriel, un bien d'équipement, un service ou un produit agroalimentaire est conforme à des normes ou à des spécifications déterminées, chacun de ces domaines ayant ses spécificités.

Les normes ou spécifications techniques peuvent ne concerner que quelques aspects spécifiques d'un produit, par exemple la sécurité, le respect de l'environnement ou l'absence de rayonnements parasites ou dangereux.

Bien sûr, tous les produits ou services ne font pas l'objet d'une norme ou d'une spécification. Actuellement, la certification de produit est fortement orientée vers les aspects de sécurité ou d'environnement, et la certification de service est en pleine croissance. Pour qu'il puisse y avoir certification, il faut que l'initiative soit prise par une profession, un groupe professionnel ou tout simplement une entreprise. En tout état de cause, il faut que le référentiel soit élaboré avec les différentes parties prenantes : représentant de la profession, des consommateurs ou utilisateurs, les éventuelles administrations concernées

---

5. L'ISO ne s'est pas associé à l'élaboration de ce document. Ce référentiel est né en 1990 à l'initiative du BSI et de divers organismes certificateurs.

et parfois des experts du domaine considéré. Rappelons que la création d'une norme ne peut se faire que sous le couvert d'un organisme de normalisation tel que le Groupe AFNOR.

La certification est confirmée par l'apposition d'une marque officielle (NF, par exemple).

- **Accréditation des laboratoires d'étalonnage ou d'essais**

Elle a pour but d'attester la qualité des prestations de ces laboratoires. Elle s'appuie sur la norme NF EN ISO CEI 17025:2005. Ces normes mettent l'accent sur les compétences techniques et les moyens dont dispose le laboratoire pour faire des analyses dans un domaine donné mais couvrent également des aspects d'organisation comme la norme NF EN ISO 9001:2008.

- **Certification : un acte volontaire**

Il faut noter que les fournisseurs ne sont nullement dans l'obligation de se faire certifier lorsque cela est possible. Il s'agit de leur part d'une démarche commerciale et volontaire pour acquérir la confiance de leurs clients.

3.6.3 Textes réglementaires

Par ailleurs, la conformité à une norme peut être imposée par la réglementation. Il existe un très grand nombre de réglementations relatives aux produits achetés qui, très souvent, sont spécifiques au domaine concerné. C'est donc un domaine que nous ne pouvons pas aborder.

Chaque entreprise doit avoir une personne ou un service qui s'informe sur toutes les nouvelles réglementations nationales ou internationales qui pourraient les concerner.

3.6.4 Marquage CE

Le marquage CE (Communauté européenne) fait partie de ces réglementations. Il est obligatoire pour la circulation des produits en Europe. Il ne s'agit pas d'un certificat de qualification. Il ne fait qu'indiquer la conformité à une réglementation européenne. Cette conformité doit dans certains cas, conformément à la directive spécifique au produit considéré, être démontrée par un organisme de contrôle indépendant mais, dans d'autres cas, le fournisseur fera lui-même cette démonstration. Il paraît important de noter que cela n'est pas un label de qualité comme un certificat de qualification, même s'il présente quelques points communs.

3.6.5 Audit client

À défaut de certification, le client peut lui-même réaliser des audits chez le fournisseur sur son système, son procédé ou ses produits.

L'audit peut être fait par le client selon ses propres exigences. La tendance est de s'appuyer pour le management de la qualité sur la norme NF EN ISO 9001:2008 avec éventuellement des exigences complémentaires spécifiques au client. Mais on voit là tout l'intérêt pour le client de demander à ses fournisseurs de se faire certifier. En effet, cela permet d'éviter des coûts d'audit pour le client et des frais liés à des audits répétés par des clients différents pour le fournisseur.

3.6.6 Prix qualité

Certaines entreprises engagent des démarches pour se présenter à un prix qualité. Les résultats obtenus donnent une information importante sur le niveau d'implication de l'entreprise dans les démarches qualité.

Citons le prix européen de l'EFQM *(European Foundation for Quality Management*).

L'EFQM a élaboré un véritable référentiel d'autoévaluation du management de la qualité. Même si l'entreprise n'a pas décidé de se présenter, ce système d'autoévaluation lui permet de mesurer son niveau de performance dans le domaine du management de la qualité. Ce référentiel est d'inspiration « qualité totale » (TQM : *Total Quality Management*) et intègre des éléments tels que la qualité du management, la satisfaction des clients, la satisfaction du personnel, les résultats opérationnels. Il s'appuie sur la gestion des processus.

L'EFQM étend son activité dans quelques pays hors Europe.

3.6.7 Démarches d'excellence

Dans le même esprit, les fournisseurs peuvent faire la démonstration au cours d'audit ou de visite d'évaluation de la mise en place effective de démarche ou méthodes qualité qui vont parfois très au-delà des exigences de l'ISO 9001 et qui sont pour l'acheteur un gage de confiance. Citons, à titre d'exemple, la méthode Six Sigma (6 σ) de type « qualité totale » et qui mobilise tout le personnel vers la satisfaction des clients et l'amélioration du fonctionnement de l'entreprise.

3.6.8 Contrôles

Le thème du contrôle étant très général, nous en avons fait un chapitre spécifique (*Voir chapitre 7*). Nous allons nous limiter ici aux spécificités des contrôles en relation avec les achats/approvisionnement.

● Différents types de contrôles

La tradition a longtemps été, pour le client, de s'assurer de la conformité des produits ou lots de produits livrés par les fournisseurs en faisant lui-même un contrôle chez lui ou parfois chez le fournisseur. On distingue alors plusieurs types de contrôle.

● Contrôle de qualification

Il consiste à s'assurer, avant le lancement de la production, que le produit est conforme aux spécifications et convient bien à l'application envisagée. Ce type de contrôle est particulièrement important pour les produits conçus spécifiquement pour le client par le fournisseur. Le contrôle, très approfondi, porte sur un maximum de caractéristiques allant bien au-delà de ce que l'on fait au cours d'un contrôle réception de routine. Les contrôles sont effectués sur des produits provenant de la conception (maquettes, prototypes…) ou de la production en présérie. Lorsque le fournisseur a un développement à assurer, il est bon de se mettre d'accord sur un programme de qualification. Le fournisseur aura à fournir les résultats obtenus aux différentes étapes du développement ainsi que des prototypes ou échantillons dûment identifiés, en quantité et délai clairement définis. Ce type de contrôle est très riche car il permet :

- de confronter les résultats de contrôle entre le fournisseur et le client en évitant notamment des désaccords sur les méthodes de mesure ;
- de s'assurer que client et fournisseur se sont bien compris sur les spécifications à respecter ;
- d'assurer au client que la conception du produit est conforme à ses attentes ;
- au client de remédier aux lacunes de ses spécifications même si cela implique des renégociations.

● Contrôle de réception[6]

Après la conception, lors du stade de production régulière, le principe du contrôle réception consiste à contrôler les produits ou les lots de produits à la réception chez le client ou chez le fournisseur lui-même.

D'une façon quasi générale, c'est un contrôle fait par échantillonnage. On peut utiliser les tables de la norme NF ISO 2859-1 présentée dans le chapitre sur « Le contrôle par échantillonnage ». Nous avons montré à quel point les contrôles

---

6. Nous traitons en détail le thème du contrôle au chapitre 7.

de lots par échantillonnage étaient peu « sélectifs » et, par conséquent, que le retour d'information et la procédure d'actions correctives étaient au moins aussi importants que le contrôle lui-même.

En principe, les produits doivent avoir été déjà contrôlés par les fournisseurs. Les contrôles réception sont donc antiéconomiques et la tendance est de les supprimer. Il est préférable de négocier avec les fournisseurs la réalisation de contrôles chez eux, de préférence par eux-mêmes. De plus, la pratique du juste-à-temps ne permet plus de faire du contrôle réception, sauf à prendre le risque d'obtenir les résultats du contrôle effectué sur un prélèvement après que les produits ont été consommés. La pratique du contrôle réception dénote un manque de confiance, parfois justifié, en son fournisseur.

On peut également demander aux fournisseurs de tenir à disposition ses propres résultats de contrôle qui pourront être examinés par le client à l'occasion de problèmes ou lors de visites de routine. Il n'est pas recommandé de demander l'envoi systématique des rapports de contrôle, à l'exception des rapports d'analyse qui sont parfois indispensables pour réceptionner un lot de produit chimique par exemple. On demande aussi parfois au fournisseur un certificat assurant que les contrôles ont été faits et que le résultat était bon. Nous ne sommes pas convaincus de l'utilité d'un tel certificat. En revanche, la transmission d'un compte rendu d'analyse pour les produits chimiques est très utile.

Enfin, si la suppression des contrôles de réception paraît souhaitable, elle doit être faite en connaissance de cause. Dans certains cas, la confiance envers certains fournisseurs est trop faible pour prendre ce risque. De plus, certaines non-conformités peuvent apparaître en cours de transport. Enfin, il est bon de garder une petite structure de contrôle en prévision de problèmes signalés en production ou même plus tard en clientèle. Cette structure doit être plus orientée vers des investigations ponctuelles que vers du contrôle proprement dit et cela implique de garder un potentiel de moyens de mesure et d'analyse.

3.6.9 Plans qualité du fournisseur

Lorsqu'un fournisseur développe et lance en fabrication un produit, il se doit d'avoir un « plan qualité en conception » et un « plan qualité en fabrication ». La connaissance de ces plans et des résultats obtenus dans leur mise en place est particulièrement intéressante pour avoir confiance dans la qualité du produit, notamment lorsqu'il s'agit d'un produit conçu spécialement pour le client.

● Plan qualité de conception

Conformément à la norme ISO 9001:2008, un fournisseur qui conçoit et développe un produit se doit d'organiser son suivi de développement par « phases » sanctionnées chacune par des « revues » au cours desquelles il vérifie que tous les objectifs de la phase sont bien atteints avant de décider de passer à la phase suivante.

Le schéma suivant qui présente un exemple illustre ce principe (*Voir Figure 3.3*).

Il faut définir clairement :

– chaque phase avec son but, les responsabilités, ce qui doit être réalisé ;
– chaque étape de décision (les jalons) avec les éléments à prendre en compte pour la prise de décision, les personnes habilitées à prendre les décisions.

Chaque étape se matérialise par une réunion formelle avec toutes les personnes habilitées et les représentants de l'équipe projet. Un document signé doit officialiser la prise de décision.

Les points à examiner sont à détailler pour chaque revue. On observera les résultats obtenus durant chacune des phases et plus généralement :

– les spécifications du produit ;
– le plan qualité et les procédures spécifiques ;
– les résultats qualité ;
– le coût du produit ;
– l'état de la documentation (produit, fabrication, contrôle…) ;
– les achats (choix des fournisseurs, des composants stratégiques) ;
– les brevets ;
– la sécurité ;
– l'environnement, les aspects légaux ;
– le planning de développement et de production ;
– les budgets ;
– l'installation et l'après-vente ;
– etc.

Dans ce contexte, le client pourra utilement demander au fournisseur un « plan qualité de la conception » des produits achetés ainsi que des échantillons et

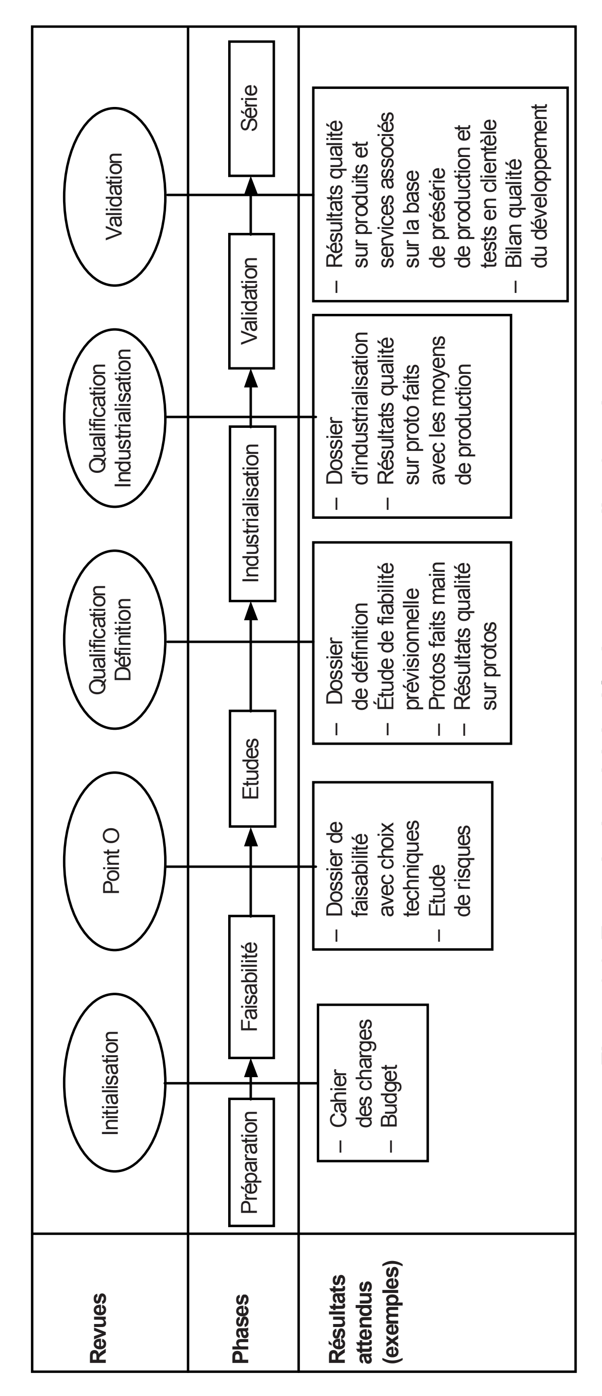


Figure 3.3 Exemple de suivi de développement d'un fournisseur

résultats susceptibles de donner une grande confiance dans la qualité du produit. Ils peuvent alors faire partie des exigences du contrat et peuvent consister en :

- la fourniture d'échantillons (maquettes, prototypes, préséries…) à différents stades ;
- les résultats de contrôles, calculs, études… faisant la preuve du respect des exigences qualité ;
- l'application de méthodes telles que l'AMDEC produit et procédé, méthode consistant à envisager tous les risques de défaillances possibles et à trouver des solutions pour éliminer les plus critiques ;
- les études de fiabilité prévisionnelle… avec fournitures des résultats ;
- les conclusions des revues,
- etc.

● **Plan qualité de fabrication**[7]

On peut demander au fournisseur de présenter des produits ou informations relatifs au produit final et susceptibles de donner une grande confiance dans la qualité du produit. Ils peuvent alors faire partie des exigences du contrat. Cela peut consister en :

- l'AMDEC du procédé et des moyens de production ;
- la vérification de la capabilité des procédés avant démarrage et en production normale (la capabilité se mesure par un indice indiquant l'aptitude du procédé de fabrication à respecter les tolérances requises sur le produit, par exemple une capabilité de 1,0 pour une caractéristique du produit est tout à fait médiocre, et des capabilités supérieures à 1,5 sont excellentes) ;
- la fourniture de produits de présérie avec les résultats de contrôle ;
- la vérification des réglages et des produits au lancement de nouvelles séries ;
- le plan de surveillance relatif :
  - aux caractéristiques du produit ou des sous-ensembles en cours de production et au stade final ;

---

7. Nous traitons en détail de ce sujet au chapitre 5 sur le processus de production.

  - aux paramètres du processus qui peuvent avoir une influence sur la qualité ;
  - aux postes de travail.
- le plan de maintenance ;
- le suivi des moyens de contrôle et d'essai ;
- le processus de correction des anomalies (produit, procédé, personnes…) et le processus d'amélioration ;
- la gestion des modifications du produit et du procédé ;
- etc.

● **Bilan sur « les plans qualité »**

Qu'il s'agisse du plan qualité de conception ou du plan qualité de fabrication, l'acheteur dispose là d'outils très efficaces pour obtenir confiance dans le produit acheté. Mais, pour pouvoir être obtenue, cette confiance nécessite un travail important de négociations, suivis, relances, visites… qui doit être proportionné aux enjeux.

3.7 Évaluation des fournisseurs

3.7.1 Objectifs de l'évaluation

L'objectif de l'évaluation des fournisseurs est d'acquérir confiance en leur capacité à satisfaire les besoins du client représenté par son service achat.

L'acheteur doit être au centre de l'évaluation des fournisseurs qu'il doit assurer avec la collaboration des différents services : développement, production, qualité, audit, logistique…

Il faut distinguer deux types d'évaluations :

- **L'évaluation** *a priori* de fournisseurs potentiels que l'on ne connaît pas ou mal. Cette évaluation sera un critère important dans la sélection d'un fournisseur.
- **L'évaluation** *a posteriori* d'un fournisseur avec lequel on travaille régulièrement. Cette évaluation sera la base des plans de progrès à moyen et long termes demandés aux fournisseurs.

L'évaluation ne doit pas être confondue avec l'audit qui a pour objectif de vérifier la conformité à un référentiel préétabli.

3.7.2 Commentaires sur l'évaluation et la norme ISO 9001:2008

La norme ISO 9001 impose

> «… d'évaluer et sélectionner les fournisseurs en fonction de leur aptitude à fournir un produit conforme aux exigences de l'organisme. Les critères de sélection, d'évaluation et de réévaluation doivent être établis. Les enregistrements des résultats des évaluations et de toutes les actions nécessaires résultant de l'évaluation doivent être conservés. »

Ceci mérite quelques réflexions.

Cette obligation porte uniquement sur « leur aptitude à fournir un produit conforme », autrement dit, cela suppose de se référer à des critères qualité, ce qui est la moindre des choses dans le cadre d'une certification d'un système de management de la qualité. Dans la pratique, ce seul critère nous paraît insuffisant. Il sera bon de lui adjoindre d'autres critères tels que financiers (solidité financière du fournisseur par exemple), commerciaux (possibilité de coopérations techniques par exemple), logistique (localisation ou flexibilité par exemple), etc.

Une question se pose : cette évaluation doit-elle concerner tous les produits achetés ? Il nous semble qu'une bonne interprétation de la norme est que l'évaluation des fournisseurs peut se limiter aux produits achetés entrant dans la composition du produit fini qui sera vendu au client et à tout autre produit participant directement à la conception ou réalisation du produit vendu (tel que machine de production, moyen de contrôle, par exemple). Mais cette pratique de l'évaluation mérite, au-delà des exigences pour la certification, d'être étendue à d'autres produits achetés importants pour la société.

Force est de constater que, dans la pratique, il est impossible d'évaluer tous les fournisseurs. Il faut être réaliste et à cet égard la phrase du premier paragraphe prend toute son importance : « Le type et l'étendue de la maîtrise appliquée au fournisseur et au produit acheté doivent dépendre de l'incidence du produit acheté sur la réalisation ultérieure du produit ou sur le produit final » (*Voir chapitre 6*). À notre sens, concernant l'évaluation des fournisseurs, cela autorise à aller d'une évaluation approfondie pour certains produits à la quasi absence d'évaluation pour d'autres.

En conclusion, nous allons présenter une méthode d'évaluation des fournisseurs adaptée à des fournisseurs et produits importants pour l'entreprise, sachant que, dans la pratique, il sera nécessaire pour certaines catégories de produits d'adopter des méthodes ou démarches simplifiées et, pour d'autres de constater, l'inutilité ou l'impossibilité d'évaluer. En tout état de cause, il est donc nécessaire de

définir les différentes catégories de produits achetés et la méthode d'évaluation correspondant à chaque catégorie. Enfin, s'il y a lieu de prendre avant tout en considération les catégories de produits entrant dans le cadre des exigences de la norme ISO 9001, nous conseillons d'étendre aussi la pratique des évaluations des fournisseurs à d'autres produits jugés importants pour l'organisme : l'évaluation se révèle en effet un outil très efficace et générateur de profits.

3.7.3 Évaluation *a priori*

Nous proposons une méthode générale qui peut être simplifiée en fonction de l'entreprise et de ses objectifs.

L'évaluation a priori comprend deux parties :

– la présélection ;
– l'évaluation proprement dite.

● Présélection

Elle s'effectue sur la base d'une visite qui, bien que pouvant être assez rapide et superficielle, est le plus souvent riche d'enseignements. Des points tels que l'organisation, les effectifs, les moyens techniques et industriels, la propreté, l'ordre, etc. y sont examinés ainsi que le bon climat, ou la qualité de la gestion, etc.

On peut également s'appuyer sur un questionnaire d'évaluation préliminaire simplement envoyé au fournisseur. Les questions portent sur :

– l'identification de l'entreprise ;
– le domaine d'activité ;
– le statut juridique ;
– le chiffre d'affaires ;
– l'effectif détaillé et organigramme ;
– l'identification des activités ;
– les moyens de production ;
– la gestion et l'assurance de la qualité.

● Évaluation

Si le fournisseur paraît correspondre aux attentes une évaluation beaucoup plus approfondie peut être effectuée sur la base d'une visite. Cette évaluation s'appuie sur un outil essentiel : le « questionnaire d'évaluation *a priori* ».

Questionnaire d'évaluation *a priori*

1-Adapter le questionnaire au client

Ce questionnaire est spécifique au client. En effet, chaque entreprise a sa politique et ses besoins propres et le choix d'un fournisseur doit s'en inspirer fortement. Par exemple, si, conformément à sa politique, l'entreprise attend de ses fournisseurs qu'ils améliorent en permanence leurs produits, on mettra l'accent sur leur aptitude à innover, sur leurs compétences et moyens technologiques et sur leur efficacité dans la gestion de l'amélioration de la qualité.

Pour la mise au point d'un questionnaire d'évaluation *a priori*, nous proposons la démarche suivante.

2-Définir 4 à 6 catégories

Il s'agit de structurer le questionnaire par thème. Les thèmes les plus communément traités sont :

- la stratégie du fournisseur vis-à-vis du marché, la politique d'innovation, les axes de développement ;
- la solidité financière et la politique de réduction des prix ;
- l'aptitude à respecter les données contractuelles concernant les produits et/ou services et la logistique. Le fournisseur doit être en mesure de montrer ses performances à partir de différents documents d'enregistrement tels que des résultats de contrôles, les réclamations clients, les évaluations par d'autres clients, les indicateurs logistiques, les certifications de produits ou services ;
- la qualité des moyens techniques et les compétences du personnel, que ce soit en conception, production, achats, logistique…
- l'évaluation du système de management de la qualité (on s'appuiera autant que possible sur les certifications obtenues ou sur les résultats une éventuelle auto-évaluation EFQM par exemple) ;
- l'évaluation du comportement commercial et partenarial. Ce dernier point devient de plus en plus essentiel dans les relations client-fournisseur. Le client souhaite s'assurer, par exemple, que le futur fournisseur est ouvert à rechercher avec lui des idées d'amélioration dans les différents domaines techniques, logistique, coûts, à participer à la rédac-

tion des spécifications, à mettre à disposition ses résultats de contrôle, à adapter ses contrôles en fonction des demandes, à réagir en cas de difficultés…

Il est possible d'établir des questionnaires beaucoup plus simples, axés sur quelques points particulièrement importants pour le client. Mais un questionnaire détaillé, bien que demandant plus de travail, nous paraît limiter les risques d'erreur d'appréciation.

3-Rechercher des critères d'évaluation pour chacune des catégories

Pour chacun des thèmes, le client détermine des critères d'évaluation. Pour cela, il s'inspire de la politique et des objectifs des achats qui, eux-mêmes, doivent être fixés en fonction de ceux de l'entreprise.

L'exemple suivant (*Tableau 3.7*) sur le thème du « comportement commercial et partenarial » d'un fournisseur n'a de sens que si l'entreprise souhaite développer des relations de coopération avec ses fournisseurs.

Tableau 3.7 Évaluation du comportement commercial et partenarial d'un fournisseur

Comportement commercial et partenarial	**Notes**					**Pondération**	**Résultats**
	1	2	3	4	5		
Compétences						3	
Dispose d'une équipe commerciale disponible et compétente			3			2	6
Recherche régulièrement comment améliorer ses prestations						1	
Est soucieux des engagements					5	2	10
Comportement partenarial						2	
Avertit à l'avance en cas de problèmes				4		3	12
Réagit rapidement en cas de problèmes (qualité, logistique…)						3	

Tableau 3.7 Évaluation du comportement commercial et partenarial d'un fournisseur (fin)

Comportement commercial et partenarial	Notes					Pondération	Résultats
	1	2	3	4	5		
Est prêt à participer à la rédaction des spécifications		2				3	6
Est disposé à envoyer ses résultats de contrôle					5	3	15
Est disposé à modifier ses contrôles en fonction de nos demandes				4		3	12
Proximité géographique	1					3	3
Logistique							
À un temps de réaction court vis-à-vis d'une commande		2				1	2
À une flexibilité en délai et quantité adaptée à notre demande				3		1	3
Total obtenu							78
Maximum							120

Ce qui nous donne une note de 78/120 = 65 %.

4-Mettre au point un barème d'évaluation

Dans l'exemple précédent, le client a choisi d'évaluer avec une note allant de 1 à 5. Il faut alors définir très précisément à quoi correspond chaque note de telle sorte que différents évaluateurs adoptent les mêmes critères de notation.

Prenons l'exemple de la question : « Est disposé à modifier ses contrôles en fonction de nos demandes ». On peut définir ainsi le barème :

- 1 : Refuse toute modification
- 2 : Accepte des modifications mineures à condition de pouvoir les facturer.

– 3 : Accepte des modifications mineures sans révision de prix.
– 4 : Accepte des modifications mineures et, pour des modifications plus conséquentes, exige la facturation de la modification.
– 5 : Est prêt à négocier toute modification.

On observe que les notes font l'objet de pondérations qui dépendent de l'importance du point considéré pour le client et notamment de sa politique qualité à l'achat.

Par ailleurs seuls sont retenus les critères sur lesquels le client a pu porter un jugement :

$$\text{Note} = \frac{\text{somme des points obtenus}}{\text{somme des résultats maximum des critères évalués}}$$

Le bilan des différentes catégories (thèmes) est établi comme proposé dans l'exemple suivant (*voir Tableau 3.8*).

Tableau 3.8 Exemple d'évaluation globale

	Évaluation en %	**Pondération**	**Bilan en %**
Politique et aspects financiers	75	1	75
Comportement commercial et partenarial	50	3	150
Moyens techniques et industriels	80	2	160
Performances (produit, logistique, prix)	70	1	70
Management de la qualité	50	2	100
Total		**9**	**555**

Ce qui donne une note globale de 555/900 = 62 %.

Il est traditionnel de traduire la note par une classification (*Voir Tableau 3.9*).

Tableau 3.9 Traduction de la note en classification

A Bon	B Moyen	C Insuffisant	D Inacceptable
80 à 100 %	60 à 79 %	40 à 59 %	0 à 39 %

En principe, la classe D élimine systématiquement le fournisseur. Il peut arriver qu'un fournisseur classé en C soit retenu s'il présente un avantage important, par exemple la maîtrise d'une technologie rare et importante pour le client, mais dans ce cas une demande forte est faite au fournisseur d'apporter les améliorations nécessaires.

5-Organiser les évaluations

Cette organisation nécessite une bonne préparation en déterminant clairement qui va réaliser les évaluations. L'idéal est de les faire à deux, par exemple un acheteur et un technicien, éventuellement une personne du service qualité.

Les évaluateurs doivent être préalablement formés sur deux plans :

– la connaissance approfondie du questionnaire et notamment du barème d'évaluation ;
– la façon de mener les interviews chez le fournisseur.

Une visite approfondie permet alors d'évaluer le fournisseur par des questions le plus souvent indirectes et par recoupement des informations recueillies.

Par ailleurs, les visites doivent être préparées avec le fournisseur, avec une grande rigueur, comme pour un audit.

6-Valider

Un questionnaire doit être validé à l'issue d'un test avec quelques fournisseurs. Les questions peuvent s'avérer difficiles à comprendre ou non pertinentes. Mais une fois le questionnaire validé, il est souhaitable de le figer autant que possible pour garder une cohérence dans le temps.

3.7.4 Évaluation *a posteriori* des fournisseurs

● Différents thèmes

L'évaluation se fait sur la base des résultats réels observés sur les livraisons de produits par le fournisseur et sur la qualité de la relation de la part du fournisseur. On distingue généralement quatre grands thèmes :

– le produit et « les services associés au produit »[8] ou le service ;

8. Les services associés peuvent être, par exemple, une formation, un service après vente, une aide à l'entretien du produit, etc.

– la logistique ;
– les prix ;
– la qualité de la relation.

● **Sources d'informations**

Les informations permettant l'évaluation peuvent provenir de sources différentes : contrôle réception, production, achat, approvisionnement, réception, magasin, conception, qualité, clients de l'entreprise, parfois le fournisseur lui-même dans le cadre de clauses contractuelles sur la communication de ses résultats…

● **Type de mesure**

Les mesures relevées ont des formes différentes : des taux (de pièces défectueuses, de lots défectueux…), des notations portant sur des appréciations subjectives (notation de A à D ou 1 à 5…), des temps (délais, retards), etc.

● **Choix des critères d'évaluation**

Le Tableau 3.10 (*page suivante*) propose, à titre d'exemple, une liste non exhaustive de critères d'évaluation en précisant les sources d'information, le type d'indicateur possible, l'unité de mesure de l'indicateur. Cette liste est plutôt adaptée à un produit industriel de grande série, mais on peut s'en inspirer d'une façon générale.

● **Critères complémentaires**

On peut ajouter d'autres critères en s'inspirant du questionnaire d'évaluation *a priori* pour les fournisseurs qui ont fait l'objet d'une telle évaluation. Dans ce cas, on sélectionne dans ce questionnaire les thèmes qui restent pertinents lorsque les livraisons ou prestations sont réalisées. On s'intéresse alors principalement à tout ce qui concerne la qualité de la relation.

● **Choix d'une unité de référence**

Le tableau 3.11 (*p. 116*) montre que, selon le point évalué, il faut déterminer un indicateur spécifique et une unité de référence qui peut être différente d'un cas à l'autre. Ceci peut rendre difficile une évaluation globale. Nous allons examiner quelques cas.

Évaluation par lots

L'estimation par lot est simple et même parfois quelque peu simplificatrice.

Tableau 3.10 Critères d'évaluation

Thème	Rubriques	Source d'informations	Indicateurs	Unité de référence sur laquelle porte la mesure
Qualité produit et services associés	Qualité produit	Contrôle réception	Taux de défauts ou proportion de pièces : – Refusés – Acceptés par dérogation – À problèmes	Produit ou Lot de livraison
		Contrôle fournisseur	Taux de défauts	Produit ou Lot de livraison
		Production	Taux de défauts	Produit
		Client	Taux de défauts	Produit
		SAV client	Taux de défauts	Produit
	Qualité emballage et conditionnement	Magasin ou Production	Taux de défauts	Produit ou Lot de livraison
	Qualité de la documentation	Utilisateur	Notation	1re livraison
	SAV fournisseur	Achat	Taux de produits mal réparés Taux de produits non remis dans les délais	Produit
Logistique	Délais non respectés	Approvision-nement	Moyenne nombre de jours	Lot de livraison
	Quantités non respectées	Magasin	Proportion moyenne	
	Erreurs de lieu de livraisons	Magasin	Proportion moyenne	

Tableau 3.10 Critères d'évaluation (fin)

Logistique	Erreurs sur documents d'accompagnements	Magasin	Taux d'erreurs	Lot de livraison
	Non-respect des conditions de transport	Magasin	Taux d'erreurs	
Prix	Évolution Compétitivité	Achats	Prix par rapport à concurrence Taux d'évolution annuel	
Qualité de la relation	Temps de réaction aux nouvelles commandes	Achats	Temps Notation	
	Qualité de la réaction aux réclamations	Production	Notation	
	Qualité de la coopération pour amélioration : Produit Approvisionnement Logistique	Conception Production Approvision-nement	Notation	

Une évaluation par lots est particulièrement bien adaptée au contrôle réception. Elle permet une évaluation globale avec une technique dite de « démérite ». Toute non-conformité fait perdre des points par rapport à un maximum de 100.

Par exemple, chaque livraison défectueuse est affectée de points de démérite comme dans l'exemple ci-dessous (*Voir Tableau 3.11*).

Évaluation sur les produits

Pour des évaluations en production ou en SAV client, une évaluation par produit est mieux adaptée, notamment pour des produits de grandes séries. Il est alors de plus en plus fréquent d'estimer un taux de défauts constaté par produit/fournisseur sous forme de ppm (parties par million) pour prendre en compte les exigences de taux de plus en plus faibles ; par exemple 10 ppm = 0,001 %.

On conçoit qu'un tel chiffrage ne puisse se faire que sur la base de grandes quantités de produits. Pour les résultats en SAV le mieux est d'estimer des taux de défaillances par composant/fournisseur mais cela est rarement possible.

Tableau 3.11 Évaluation *a posteriori* par lot de livraison

Critères d'évaluation	Points de démérite	Nombre	Résultats
Refus de la livraison complète	2	2	4
Refus partiel de la livraison	1	0	0
2e refus consécutif	3	0	0
Conditionnement détérioré	1	5	5
Non-respect du conditionnement	0,5	1	0,5
Écart de quantité	1,5	1	1,5
Non-respect du délai	1,5	0	0
Absence de bon de livraison	0,5	0	0
Absence de certificat de conformité	1	0	0
Tri nécessaire	1,5	0	0
Difficultés en production (notées de 1 à 5 selon l'importance du problème)	3 3	0 1	0 3
Total		10	14
Nombre de livraisons		50	

$$\text{Démérite} = 100 \times \left(1 - \frac{\Sigma \text{ démérites des livraisons}}{\text{Nombre de livraisons}}\right) = 72\ \%$$

L'évaluation du fournisseur peut se faire alors en comparant les taux de ppm ou taux de défaillances effectifs par rapport à ceux négociés le cas échéant.

S'il s'agit des résultats par prélèvement sur un lot, il est aisé de ramener le taux de défauts à la population du lot.

Il est acceptable d'additionner les taux de défauts aux différents stades pour obtenir un indicateur global.

Évaluation par notation

On entend par « Notation » l'attribution d'une note allant par exemple de 1 à 5 (ou d'une évaluation par A, B, C, D…) selon des critères plus ou moins objectifs par exemple : 1 = mauvais et 5 = excellent.

En général, cette évaluation est faite par un panel de personnes de l'entreprise en relation avec les fournisseurs ou concernées par la qualité des fournitures.

- **Périodicité**

Il faut fixer la périodicité de l'évaluation qui peut être différente selon les critères. Par exemple : mensuelle pour l'évaluation sur les lots de produits réceptionnés, annuelle pour la notation par un panel.

- **Évaluation globale**

Le fait que les évaluations s'expriment sous des formes différentes : pourcentages, notes, délais etc., implique de les ramener toutes à une échelle commune, par exemple une note de 1 à 5 pour en faire un total ; certaines notes peuvent se voir attribuer une pondération en fonction de l'importance du critère. Il est traditionnel de classer les fournisseurs en catégories A, B, C, D. Pour cela, on établit un barème en additionnant l'ensemble des notes.

Tableau 3.12 Exemple d'évaluation globale d'un fournisseur

Critères d'évaluation	Note de 1 à 5	Pondération	Note globale
Critère 1	3	3	9
Critère 2	4	2	8
Critère 3	5	2	10
Critère 4	3	1	3
Total			**28**

La note totale est à comparer à la note maximum, ici : 40 soit 28/40 = 70 %.

On se fixe un barème pour la note globale conformément à l'exemple du tableau suivant (*Tableau 3.13*).

Tableau 3.13 Résultats globaux

A Bon 80 à 100 %	B Moyen 60 à 79 %	C Insuffisant 40 à 59 %	D Inacceptable 0 à 39 %

– La classe D conduit à changer le fournisseur.

– La classe C va entraîner une action importante auprès du fournisseur.

– Les fournisseurs en classe B seront vivement incités à évoluer vers la classe A.

● Organisation des évaluations

Les sources d'information étant dispersées dans l'entreprise, on imagine mal que le traitement de l'information se fasse autrement qu'à travers le réseau interne informatique. L'analyse du tableau 3.10 donné en exemple illustre que la saisie des données, leur mise en forme et leur regroupement exigent une organisation rigoureuse avec des responsabilités bien définies.

Dans certains cas, un accord avec le fournisseur permet d'intégrer *via* internet les propres résultats du contrôle de sortie du fournisseur.

Un suivi de type ppm en production, suppose la mise en place en fabrication d'un système de relevé systématique de tous les défauts, de pouvoir les attribuer à chacun des fournisseurs et de les comparer aux quantités réellement consommées. Là encore les moyens informatiques sont les mieux adaptés.

Il en est de même pour un suivi des résultats en SAV.

Pour une évaluation par notation sur une période, la méthode d'évaluation consiste à réunir annuellement le plus souvent, en interne, un panel de personnes en relation avec les fournisseurs : personnes des services achat, approvisionnement, réception, magasin, production, qualité, par exemple. Elles passent alors en revue les différents points du questionnaire.

Un point important est de bien définir les fournisseurs soumis à évaluation. Ce doit être ceux qui fournissent d'une façon régulière des produits considérés comme importants.

● Validation

Il est nécessaire de tester le dispositif sur une certaine période pour s'assurer que les résultats permettent de bien discriminer les fournisseurs. Par exemple, si les notes de démérites sont la plupart à un niveau proche de 100, le système n'est pas discriminant.

● Communication des résultats

Une fois les évaluations réalisées, il est important de mettre en place un système de communication des résultats aux fournisseurs. Si les résultats sont insuffisants, le fournisseur se verra demander de façon formelle un plan d'amélioration.

3.8 Comment gérer les relations avec les fournisseurs

3.8.1 Démarche en plusieurs étapes

Les points examinés jusqu'ici font l'objet d'une mise en œuvre nécessitant d'organiser la relation avec les fournisseurs. Cette relation, dont les modalités devraient être prévues dans le contrat, peut suivre les étapes suivantes. Nous partons de la situation où le fournisseur est connu ou a été sélectionné suite à une évaluation éventuelle.

3.8.2 Préparation et signature du contrat

Il s'agit de l'ensemble des contacts et négociations préalables à la signature du contrat et de la signature proprement dite.

3.8.3 Qualification du produit

Celle-ci se fait sur la base :

- des échantillons présentés par le fournisseur ;
- des résultats obtenus par celui-ci : bilan de la conception, calculs, résultats de contrôles, etc. ;
- d'un contrôle de qualification du produit par l'entreprise.

3.8.4 Vérification de tous les documents

Il s'agit de tous les documents contractuels tels que « plans qualité », rapports, certificats de certification, etc.

3.8.5 Gestion des actions correctives

Après le début des livraisons, des défauts peuvent apparaître sur les produits livrés, à quelque stade que ce soit (à la réception, en production, en clientèle) ou des anomalies dans le domaine de la logistique. Une action corrective de la part du fournisseur peut s'avérer nécessaire. Cela peut être :

- la réparation ou le remplacement des produits défectueux ;
- un plan d'amélioration.

Ces actions correctives peuvent être demandées au coup par coup ou sur le long terme à l'occasion d'un bilan sur une période.

En principe, les défauts sont des non-conformités par rapport aux exigences du contrat. Mais une bonne relation clients-fournisseurs se doit de dépasser ce cadre et il est souhaitable de se placer dans une logique de progrès. Il est extrêmement difficile de tout exprimer dans un contrat et on peut attendre d'un fournisseur des améliorations prenant en compte des insatisfactions sur les points non contractuels avec éventuellement des renégociations de prix.

3.8.6 Suivi régulier des performances (qualité produit, logistique, relationnelle, etc.)

Ce suivi se fait à partir du système « d'évaluation *a posteriori* » des fournisseurs et peut déboucher sur des demandes d'amélioration.

Il est essentiel d'informer le fournisseur des résultats obtenus. En effet, sans cette boucle de réaction, le fournisseur risque de ne pas progresser car il n'a, en général, pas conscience des insatisfactions ressenties par le client.

La différence avec la gestion des actions correctives est son caractère plus général. On ne traite pas nécessairement de point spécifique mais une demande d'amélioration globale.

3.8.7 Gestion des évolutions

Dans le cadre des procédures incluses dans le contrat, il faut traiter les problèmes suivants :

- réclamations et pénalités ;
- demandes de dérogation du fournisseur ;
- modifications des produits ou de la logistique, que ce soit à la demande de l'entreprise ou sur proposition du fournisseur.

3.8.8 Développer la coopération avec les fournisseurs

Nous avons vu à quel point les fournisseurs ont un rôle fondamental sur la qualité des produits ou services fournis par une entreprise. Il est donc souhaitable de développer des relations de coopération avec eux autant que possible.

La situation la plus traditionnelle est que le client commande un produit soit sur catalogue soit en rédigeant une spécification. Le fournisseur s'efforce de répondre à cette demande. Par la suite, il recevra des demandes de réduction de prix jugées indispensables par le client dans la situation de concurrence existante. Le fournisseur est alors plus ou moins contraint de baisser son niveau de qualité.

Cette approche n'est pas satisfaisante. Il est souvent très efficace d'adopter un autre mode de relation entre clients et fournisseurs. Il faut que, très tôt, le client exprime son besoin d'une façon fonctionnelle : il rencontre le fournisseur en lui exprimant à quoi va servir le produit acheté et ce qu'il en attend. Il en fait une description fonctionnelle sous la forme d'un cahier des charges fonctionnelles (CdCF). Le fournisseur lui fait alors des propositions sur les différents plans : spécifications du produit en relation avec les coûts, conditionnement, possibilité de montage en automatique, mode d'approvisionnement,etc.

Il peut même émettre des propositions qui permettront au client de concevoir son produit fini d'une façon différente. Dans certains cas, les gains sur le produit fini peuvent être supérieurs au coût du composant lui-même. On voit là comment de telles relations permettent de rivaliser avec les concurrents les moins chers. Le potentiel de propositions d'un fournisseur est souvent étonnant. Et, à l'inverse, on peut constater à quel point un fournisseur qui reçoit une spécification peut se trouver bloqué dans un carcan qui lui donne peu de champ pour améliorer la qualité et réduire les prix.

Par exemple, combien de tolérances sont établies par habitude par le bureau d'études et pourtant parfaitement inutiles : pourquoi demander un état de surface très beau et cher sur une surface destinée à être cachée...

Mais cette relation doit être établie très tôt, c'est-à-dire au moment de la conception du produit fini.

Ce type de relations ne s'improvise pas. En effet, les entreprises, qui ont en général un grand nombre de fournisseurs et beaucoup de composants ou de matières à acheter, doivent nécessairement se montrer sélectives.

La norme ISO 9004 insiste beaucoup sur cette relation :

ISO 9004

§ 6.6 Fournisseurs et partenariats

« Il convient que la direction établisse des relations avec des fournisseurs et des partenaires pour promouvoir et faciliter la communication afin d'obtenir une amélioration mutuelle de l'efficacité et de l'efficience des processus qui crée de la valeur. Par le biais de leur collaboration avec leurs fournisseurs et partenaires, les organismes ont de nombreuses opportunités d'accroître la valeur, telle que :

- optimisation du nombre de fournisseurs et de partenaires ;
- établissement d'un dialogue aux niveaux appropriés dans chacun des organismes pour faciliter la résolution rapide des problèmes, et éviter des retards ou conflits coûteux ;

> – coopération avec les fournisseurs pour la validation de la capacité de leurs processus ;
> – surveillance de l'aptitude des fournisseurs à livrer des produits conformes afin d'éliminer des vérifications redondantes ;
> – encouragement des fournisseurs à mettre en œuvre des programmes d'amélioration continue des performances et à participer à d'autres initiatives communes d'amélioration ;
> – implication des fournisseurs dans les activités de conception et de développement de l'organisme pour partager les connaissances et améliorer de manière efficace et efficiente les processus de réalisation et de livraison de produits conformes ;
> – implication des partenaires dans l'identification des besoins d'achat et développement d'une stratégie commune ;
> – évaluation, reconnaissance et récompense des efforts et des résultats obtenus par les fournisseurs et les partenaires. »

3.8.9 Travailler en partenariat

La norme NF X 50-128 suggère d'entreprendre dans certaines conditions des relations partenariales :

> **NF X 50-128**
>
> **§ 5.3.1 Relations usuelles**
>
> « (…) Des contraintes techniques ou économiques, dues par exemple à la productivité, aux performances des produits et/ou services ou au besoin d'innovation, peuvent conduire à modifier ce type de relations notamment en recherchant une collaboration plus étroite entre clients et fournisseurs. »
>
> **§ 5.3.2 Relations partenariales**
>
> « Ces relations stables et profondes sont basées sur une volonté réciproque d'engagement formel pour les deux parties dans le but d'optimiser leurs intérêts communs et d'assurer leur développement mutuel à moyen et long termes.
>
> (…) La formalisation de clauses partenariales doit se faire par le biais d'une déclaration d'intention ou d'une charte. (…) »

Cette approche des relations partenariales va très loin et son application risque de se limiter à des situations exceptionnelles. Mais elle va dans un sens très intéressant.

3.9 Déterminer le niveau de maîtrise

3.9.1 Principes

La gestion de la qualité aux Achats/Approvisionnements requiert de travailler différemment avec les fournisseurs selon l'importance que leur fourniture a sur la qualité du produit final. En fonction du produit acheté et du fournisseur, il faut définir les solutions les mieux adaptées que ce soit sur le plan des exigences que du mode de relations : type de contrat avec des exigences qualité plus ou moins grandes, évaluation ou non du fournisseur, relations plus ou moins étendues, etc.

Cela répond à une exigence de la norme ISO 9001:2008 :

> **ISO 9001:2008 (§ 4)**
>
> « Le type et l'étendue de la maîtrise appliquée au fournisseur et au produit acheté doivent dépendre de l'incidence du produit acheté sur la réalisation ultérieure du produit ou sur le produit final. »

La difficulté consiste, pour le service achats, à bien gérer les différents types d'actions en définissant un nombre limité de niveaux de maîtrise par souci de simplification. Cela implique de s'appuyer sur une procédure.

3.9.2 Catégories de produits achetés

Au préalable, il est souhaitable que le service Achats répartisse les produits achetés en plusieurs catégories selon des critères qualité en fonction de l'impact que ces produits ont sur la qualité du produit final.

Exemple de catégories déterminées en fonction de deux critères :

– la probabilité qu'une défaillance du produit entraîne une défaillance sur le produit final ;

– l'importance de l'impact éventuel de cette défaillance sur la qualité du produit final.

● **Catégorie A : Importance grande**

Toute anomalie se verra directement sur le produit final en entraînant une défaillance grave.

● **Catégorie B : Importance assez grande**

Une anomalie se verra probablement sur le produit final en entraînant une défaillance majeure.

● **Catégorie C : Importance réduite**

Une anomalie peut ne pas se voir sur le produit final et en tout état de cause entraînerait une défaillance moyenne.

● **Catégorie D : Importance mineure ou nulle**

Une anomalie ne se verra probablement pas sur le produit final et en en tout état de cause la défaillance serait mineure.

Au-delà de cette classification, il est bon de distinguer si les produits achetés ont un impact sur deux autres plans : la sécurité et l'environnement. L'impact doit être considéré tant à l'intérieur de l'entreprise qu'à l'extérieur dans le produit final.

Sur la catégorie D, aucune action spécifique ne sera entreprise si ce n'est l'acceptation par le fournisseur comme il se doit des spécifications du produit acheté.

3.9.3 Mise en œuvre

Le tableau 3.14 donne un exemple de grille facilitant cette gestion. Il propose des choix en fonction de :

– la liste des actions à entreprendre ou exigences envisageables ;
– les différentes catégories précédemment déterminées.

Ce tableau peut être utilisé de deux façons. Il peut :

– fixer les actions et les exigences en fonction de la catégorie avec éventuellement des exceptions ;
– ou établir une feuille pour chaque nouveau produit, le tableau n'étant alors qu'un guide.

Tableau 3.14 Niveau de maîtrise de la qualité appliquée aux fournisseurs

Type de produits / Gestion fournisseurs	Document de référence	Catégorie produit			
		A	**B**	**C**	**D**
Actions					
Évaluation *a priori*	Guide évaluation fournisseur	Oui si nouveau fournisseur			
Évaluation *a posteriori*	Guide évaluation fournisseur	Oui	Oui	Oui	
Audit qualité		Oui si nouveau fournisseur			
Qualification du produit	Procédure de qualification[9]	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	
Contrôle réception		Si doute sur le fournisseur			
Contrôle chez le fournisseur		Pour les produits les plus critiques			
Demande des résultats de contrôle du fournisseur	À déterminer dans le contrat	Oui			
Exigences					
Certification système		Oui			
Certification du respect de l'environnement	ISO 14001	Si impact environnemental			
Certification Sécurité	Normes OHSAS 18001, SA 8800…	Si impact sur la sécurité			

Tableau 3.14 Niveau de maîtrise de la qualité appliquée aux fournisseurs (fin)

Type de produits / Gestion fournisseurs	Document de référence	Catégorie produit			
		A	B	C	D
Certification Produit ou service		Si norme en vigueur			
Plan qualité en fabrication du fournisseur	Document « Ach xxx »	Ou si conception spécifique[10]	Oui		
Clauses d'assurance qualité spécifiques	Contrat type des clauses d'assurance de la qualité[11]	Clauses complètes		Clauses réduites	
Suivi régulier		Oui			
Partenariat/coopération		Avec certains fournisseurs selon besoin			

9. La qualification est plus ou moins étendue selon la catégorie de produit. Par exemple pour la catégorie C elle se limite à un simple contrôle initial d'un échantillon.
10. On entend par « conception spécifique » le cas d'un produit conçu spécifiquement par le fournisseur pour le compte de l'entreprise qui achète.
11. Exemple de clauses relatives à la qualité : actions correctives, modifications produits, demande de dérogation, communication d'informations, réclamations, pénalités, etc.

4

La maîtrise du processus conception

4.1 Domaine concerné

Nous avons choisi de considérer que la conception s'étend depuis la demande d'un nouveau produit ou d'un produit dérivé jusqu'à son lancement en production. Cela signifie que nous y intégrons les activités d'industrialisation.

La plupart des outils, techniques, méthodes présentés sont transposables au cas des services mais nous nous plaçons ici dans le cadre d'un développement de produit.

4.2 Management de la qualité à la conception

Le management de la qualité en conception implique :

– de structurer les activités selon l'approche processus ;

– d'écrire les procédures associées ;

– de manager le processus dans une optique d'amélioration continue ;
– de mettre en œuvre les projets de conception de produits en adoptant une démarche qualité.

Nous allons développer ces différents thèmes.

4.3 La structure des activités de conception : la cartographie

La norme ISO 9001 n'impose pas spécifiquement la description du ou des processus de conception mais en préconise l'usage. Dès que le processus de conception s'avère d'une certaine importance pour l'entreprise, cette description devient de notre point de vue indispensable.

La cartographie est alors un excellent moyen de description. La figure suivante (*Voir Figure 4.1*[1]) présente la cartographie du processus de conception.

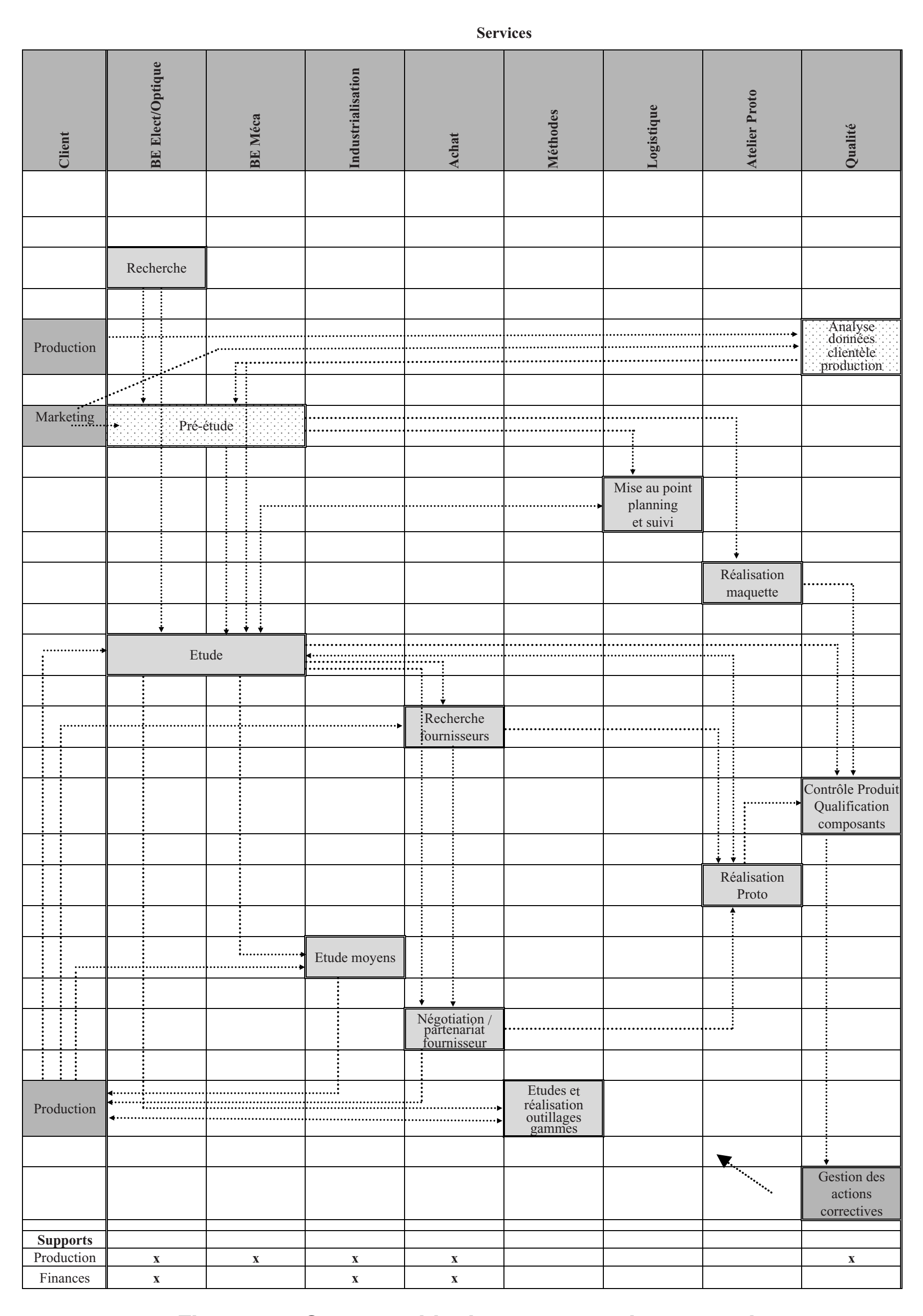
Cette cartographie met bien en valeur :

– les différentes activités de conception ;
– les services responsables ;
– les principales entrées et sorties ;
– les fonctions supports ayant à fournir une prestation dans le cadre de la conception ;
– autant d'informations qui doivent être détaillées dans des documents annexes.

Prenons l'exemple de l'activité « Étude des moyens ». La cartographie schématise les points qui seront décrits dans des documents annexes. Cette activité consiste à mettre à disposition de la production les moyens de production. Elle est sous la responsabilité du service industrialisation. Le client (interne en l'occurrence) est la « Production ».

De plus, la croix dans la case « Finance » des services supports de la cartographie illustre que ce service doit fournir une assistance. Par exemple, il doit mettre à disposition des données budgétaires relatives aux solutions envisagées par l'activité « Étude des moyens ».

1. Le choix de cet exemple est tout à fait fortuit. Sa justification tient au fait qu'au cours des formations que nous réalisons, ce type de produit est en général présent.



Supports	BE Elect/Optique	BE Méca	Industrialisation	Achat	Méthodes	Logistique	Atelier Proto	Qualité
Production	x	x	x	x				x
Finances	x		x	x				

Figure 4.1 Cartographie du processus de conception d'une entreprise de production de moyens de projection d'images

Le point le plus délicat dans l'élaboration du processus est la détermination des activités. Les deux critères majeurs sont les suivants :

– une « activité » doit représenter un volume de travail assez conséquent, sinon le risque est de la réduire à une simple tâche telle qu'on la définit dans une procédure ;
– chaque activité doit fournir un cadre adapté au management de la qualité avec un responsable chargé d'en assurer la bonne efficacité et, éventuellement, des projets d'amélioration.

Examinons quelques flèches entrant ou sortant de cette activité (*Voir Tableau 4.1*).

Tableau 4.1 Analyse de la cartographie

Flèches	Entrée ou sortie représentée
Flèche allant de l'activité « Étude des moyens » vers le client « Production »	Le service rendu, à savoir la mise à disposition des moyens de production et les formations nécessaires à leur utilisation
Flèche allant du client « Production » vers l'activité « Étude des moyens »	L'expression des exigences de la production vis-à-vis des moyens de production
Flèche allant de l'activité « Étude » vers l'activité « Étude des moyens »	Les données à fournir par l'activité « Étude » sur le produit (plans, programme, planning…) à l'activité « Étude des moyens ».

4.4 Management du processus : déploiement des objectifs d'amélioration

Une fois les activités de conception bien structurées, il faut les manager dans une optique d'amélioration continue de la qualité telle que nous l'avons présentée initialement (*Voir chapitre 1*). Nous nous limitons ici à traiter le cas du déploiement des objectifs de la conception sur les activités du processus.

L'outil proposé permet d'établir les objectifs et de vérifier que ceux fixés à un certain niveau sont en adéquation avec ceux du niveau supérieur (*Voir Tableau 4.2*) conformément à ce qui a été présenté au paragraphe 1.6.3.

À un objectif doivent être associés un ou plusieurs indicateurs qui en permettent la mesure.

Tableau 4.2 Grille de déploiement des objectifs

Tableau de déploiement des objectifs

Objectifs de la conception	5								
	4								
	3 Simplifier la maintenabilité des produits								
	2 Réduire les temps de développement								
	1 Améliorer la fiabilité des produits								
		1	2	3	4	5			
Activité	**Objectifs**		**EFFICACITÉ**				**Total**	**INDICATEUR**	**PLAN D'ACTION**
		(Corrélation avec les objectifs supérieurs)							
Analyse données clientèle et production	Améliorer le système de remonter des info SAV	10	0	3			13		
Étude	Réduire le nombre de composants	7	2	8			17		
Étude	Réduire le temps d'étude	0	10	0			10		
POIDS TOTAL		17	12	11			40		

On évalue par une note allant de 1 à 10, par exemple, dans quelle mesure l'objectif de l'activité va dans le sens de l'objectif du niveau supérieur (c'est-à-dire ici du processus conception, lui-même devant être en cohérence avec ceux de l'entreprise). Le total par objectif permet de faire un choix en mettant la priorité sur les objectifs correspondant le mieux aux objectifs de rang supérieur.[2] Le total par colonne permet d'apprécier dans quelle mesure les objectifs de la conception sont pris en compte.

4.5 Management d'un projet

4.5.1 Projet particulier

Tout ce que nous avons vu jusqu'ici était relatif à la gestion d'ensemble de la conception. Maintenant nous allons nous situer dans le cadre d'un projet particulier. Nous prenons comme exemple la conception d'un vidéo projecteur.

4.5.2 Principes du suivi d'un projet de conception

La norme ISO 9001:2008 exige de suivre la conception d'un produit selon un système de revues. Ce sont les principes de la mise en œuvre d'une telle méthode que nous allons examiner.

4.5.3 Suivi de conception

Le développement d'un produit ou d'un service comprend un certain nombre de phases. Elles sont des parties de la conception correspondant aux critères suivants :

- une phase correspond à un travail conséquent ;
- une phase aboutit à un état d'avancement clairement identifiable et est de ce fait sanctionnée par une revue qui autorise à passer à la phase suivante ;
- les phases se succèdent les unes aux autres même si dans le détail on trouve certaines tâches en parallèle ce qui est même souhaitable car les délais de conception étant le plus souvent très court tout ce qui peut être anticipé doit l'être.

---

2. Dans la description de la méthode au chapitre 1.6.3 nous avions rajouté les deux critères « Menaces, Opportunité » et « Forces et Faiblesses » que nous n'avons pas repris ici.

Chaque phase est sanctionnée par une Étape de décision. Celle-ci officialise que les conditions de passage à la phase suivante sont respectées. Cette décision est prise dans le cadre d'une « revue ».

Nous allons appuyer notre analyse sur un exemple de phases et revues qui pourrait être applicable à de nombreux types de produits. Le Tableau 4.3 et la Figure 4.2 montrent une conception avec cinq phases assez traditionnelles pour un produit industriel relativement simple.

Tableau 4.3 Exemple de phases et revues

Phase	Revue
Études de marché	
Préparation	Initialisation
Faisabilité	Point 0
Études	Qualification Définition
Industrialisation	Qualification Industrialisation
Validation	Accord pour production
Production	

La détermination des phases, de leur contenu, de leurs entrées, et de leurs sorties relève d'une procédure essentielle de la conception. La norme ISO 9001:2008 n'impose nullement une telle procédure mais il nous paraît peu réaliste de ne pas rédiger une procédure[3] pour ce thème si important.

Ce sont les éléments d'une telle procédure que nous allons décrire.

Dans tout processus de développement, il faut définir clairement :

– chaque phase avec son objectif, les responsabilités et ce qui doit être réalisé au cours de la phase ;
– chaque étape de décision (les jalons) avec les éléments à prendre en compte pour la prise de décision, les personnes habilitées à prendre les décisions.

3. Nous disons bien procédure même si l'on voit des points de convergence avec le processus de conception, par exemple une phase pourrait être considérée comme une activité. Mais ici nous décrivons comment exécuter une phase.

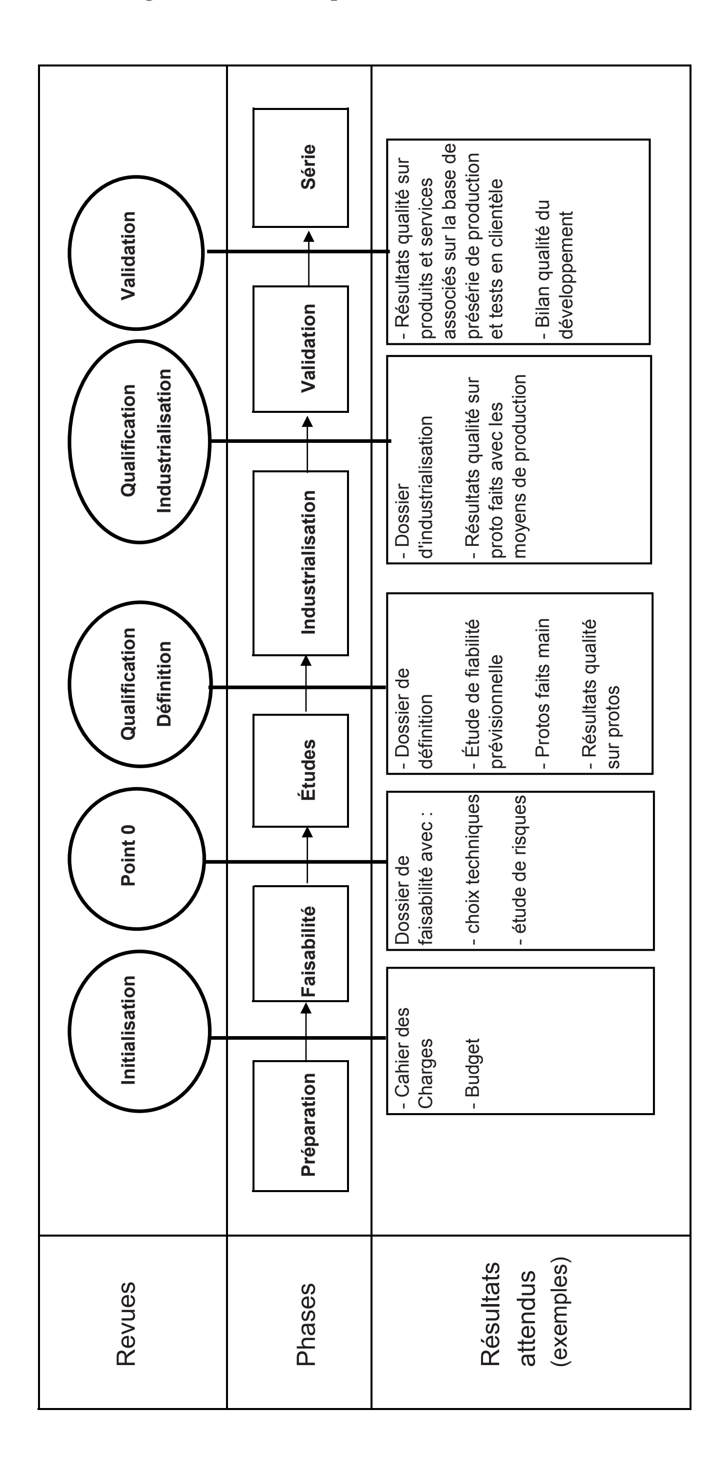


Figure 4.2 Schéma de principe sur un exemple

Chaque étape se matérialise par une réunion formelle avec toutes ces personnes habilitées et les représentants de l'équipe Projet. Un document signé doit officialiser la prise de décision.

Les sorties des différentes phases doivent être validées lors des revues.

4.5.4 Objectif d'une phase

Il est essentiel de bien définir l'objectif d'une phase. Cela permettra de déterminer les points qui doivent être réalisés ou vérifiés au cours de cette phase. C'est d'eux que dépendra la prise de décision de valider ou non la phase au cours de la revue. Le Tableau 4.4 propose un exemple d'objectifs.

4.5.5 Liste type des thèmes de points à réaliser ou à vérifier

Les points à examiner sont à détailler pour chaque revue. On observera les résultats obtenus durant chacune des phases.

Nous proposons ci-dessous une liste de thèmes qui font généralement l'objet des points à examiner à chacune des revues :

- les spécifications du produit,
- le plan qualité et les procédures spécifiques,
- les résultats qualité,
- la qualification des composants,
- les résultats d'études et la justification de choix technologiques,
- les résultats étude de risques (projet, produit, processus…),
- le coût du produit,
- l'état de la documentation (produit, fabrication, contrôle…),
- les achats,
- les brevets,
- la sécurité,
- l'environnement,
- les aspects légaux,
- le planning de développement et de production,
- les budgets,
- l'installation et l'après vente.

Tableau 4.4 Exemple d'objectifs d'une phase

Phase	Objectif de la phase
Études de marché	
Préparation	Prendre en compte les données commerciales Fixer les grandes orientations : – produit (concepts) – industrialisation (mécanisation) – production (lieu, moyens) – Détermination de l'équipe projet
Faisabilité	S'assurer que la demande commerciale est techniquement réalisable et que l'on disposera des moyens nécessaires : Technologies Compétences nécessaires Temps
Études	Concevoir un produit industrialisable En faire une description détaillée Démontrer sur la base de prototypes faits mains que le niveau de qualité requis est atteint
Industrialisation	Déterminer et éventuellement réaliser les moyens de production nécessaires Mettre au point les méthodes, instructions nécessaires pour fabriquer le produit
Validation	Faire une présérie Vérifier la conformité à l'ensemble des exigences Vérifier que le produit correspond bien aux attentes clients La validation doit se faire en fonction de tous les résultats obtenus tout le long de la conception aussi bien sur les composants, les sous-ensembles, le produit fini et sur le procédé de fabrication.
Production	

Cette liste ne prétend pas être exhaustive, chaque entreprise ayant ses spécificités.

La procédure doit indiquer dans le détail l'état d'avancement de chacun de ces thèmes pour chacune des revues.

Chaque thème peut faire l'objet de nombreux points à examiner.

Prenons le seul exemple du thème « Achats » pour lequel on pourrait vérifier si :

- la nomenclature des composants à acheter est complète ?
- les composants stratégiques sont bien identifiés ?
- les fournisseurs sont tous choisis ?
- les négociations ont été menées à bien ?
- etc.

Ce type de questions pour les différents thèmes va s'étaler dans le temps au fur et à mesure de l'avancement des phases. En général on présente l'ensemble des points à satisfaire pour chaque revue sous forme d'une « check-list ».

Le Tableau 4.5 (*page suivante*) illustre le principe sur quelques thèmes pris comme exemples.

4.5.6 Prise de décisions

La procédure doit indiquer les participants aux revues et les responsables des décisions. On utilise les lettres :

- X : pour les participants ;
- D : pour ceux qui doivent prendre la décision de valider une phase cette décision pouvant être collégiale.

Nous proposons un exemple sous forme de tableau (*Tableau 4.6*).

La décision de valider une phase implique que tous les points à traiter sont réalisés et donnent des résultats conformes à ce qui était requis.

Parfois, certains points ne sont pas encore conformes et des dérogations peuvent être accordées sous réserve de traitement des problèmes dans des délais déterminés.

Tableau 4.5 Exemple d'état d'avancement pour quelques thèmes

	Initialisation	Point 0	Qualification Définition	Qualification Industrialisation	Accord pour production
Les spécifications du produit	Cahier des Charges fonctionnel	Spécification provisoire	Spécification définitive		
Les résultats qualité produit		Résultats sur maquettes	Résultats sur prototypes (Partiels en SDF[4])	Résultats sur produits fait avec l'outil de production (complets en SDF)	Résultat test en clientèle
Résultats étude de risques (projet, produit, processus…)	AMDEC projet	AMDEC des choix stratégiques (composants, technologies)	AMDEC produit AMDEC achats/ fournisseurs	AMDEC processus	
Le coût du produit	Orientation		Provisoire		Définitif
L'état de la documentation (produit, fabrication, contrôle…)		Nomenclatures des composants et matières	Spécifications composants matières	Documentations moyens de production Instructions de fabrication Gammes	Plan de surveillance Plan de maintenance des moyens de production
Les achats		Choix des fournisseurs stratégiques	Choix de tous les fournisseurs Négociations entreprises	Négociations conclues	

4. SDF : Sûreté de fonctionnement.

Tableau 4.6 Exemple de participants aux revues

Participants / Revues	Direction	Marketing/ SAV	Bureau d'étude	Industriali-sation	Achats	Logistique	Production	Qualité	
Initialisation	D	D	D				X	X	
Point 0		D	D	X	X	X	D	X	
Qualification Définition			D	X	X	X	D	X	
Qualification Industrialisation			D	X	X	X	D	X	
Validation	D	D	X	X		X	X	D	

4.5.7 Flux des données d'entrée et de sortie de la conception d'un produit

● **Le flux des données à la conception d'un produit**

La gestion de la conception d'un produit selon le principe des phases et des revues peut être examinée sous l'angle du flux d'informations à gérer avec des données d'entrées et des données de sortie.

La Figure 4.3 illustre le flux des données réparties en quatre catégories dans le cas de notre exemple :

– Les données entrantes à la première phase fixant notamment les objectifs.
– Les données sortantes de la dernière phase correspondant aux résultats de la conception.
– Des données sortant de chaque phase et allant à la suivante étant nécessaires à son exécution.
– Des données externes entrantes nécessaires à l'exécution d'une phase et des sorties prouvant la bonne exécution de la phase.

Pour le bon fonctionnement d'un processus de conception les données doivent être bien identifiées et gérées. C'est-à-dire qu'il faut que soient déterminés :

– leur nature ;

– les responsables et destinataires ;
– leur vérification ;
– les moyens et circuits de communication.

Nous proposons une série de données à titre d'exemple.

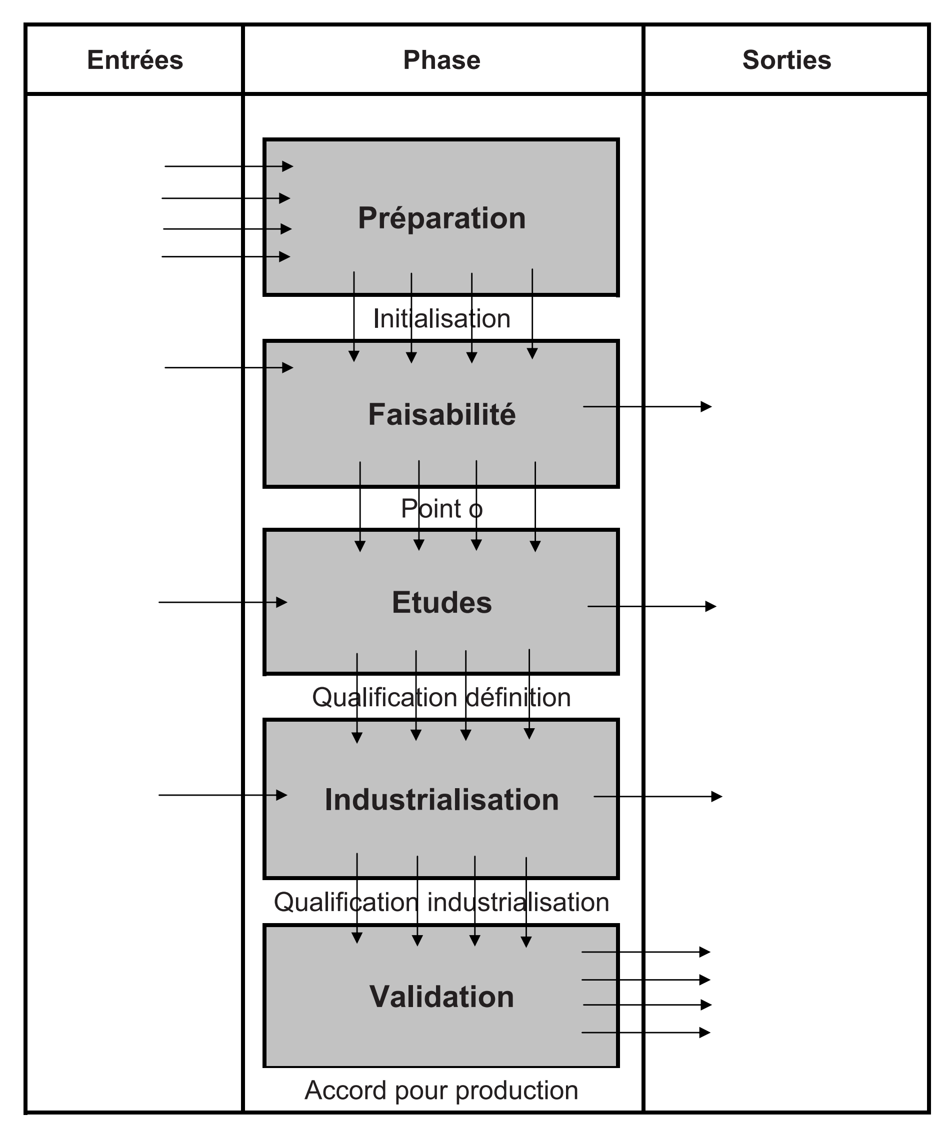


Figure 4.3 Illustration du flux des données

● **Les données d'entrée de la conception**

Le Tableau 4.7 donne des exemples de données d'entrée de chacune des phases autres que celles provenant de la phase précédente.

● **Les données de sortie de la conception**

Ces données sont en relation avec les objectifs de la conception.

Les objectifs sont de répondre aux attentes des clients internes et externes. On peut les résumer en deux grands axes :

– Répondre à la demande commerciale de concevoir un produit répondant aux attentes des clients.
– Répondre aux contraintes et demandes de la production d'un produit industrialisé, aussi simple et facile que possible à fabriquer.

Concrètement, cela devra se traduire par :

1-Le dossier de définition du produit.

Il peut comprendre à titre d'exemple :

– les spécifications[5] :
  - du produit,
  - des sous-ensembles,
  - des produits achetés ;
– la nomenclature des composants et matières entrant dans le produit ;
– le plan d'achat ;
– des dessins, schémas ;
– les méthodes de contrôle du produit ou sous-ensembles ;
– la documentation associée au produit ;
– les données techniques nécessaires à la fabrication ;
– le plan de maintenance.

5. On se reportera au chapitre sur la définition du produit qui traite en détail le problème des spécifications des produits.

Tableau 4.7 Exemples de données d'entrée de la conception

Phase	Revue	Les entrées (autres que celles en provenance des phases précédentes)
Études de marché		Bilan de l'étude de marché
Préparation	Initialisation	Exigences : – Analyse fonctionnelle – Cahier des charges fonctionnel – Spécifications du produit – Services associés Exigences réglementaires et environnementales Marché : – Quantités – Pays – Clients – Mode de distribution Aspects financiers : – Objectifs de prix – Budgets Planning
Faisabilité	Point 0	Informations de la recherche (technologie, concept…) Informations « achats » sur les fournisseurs
Études	Qualification Définition	Remontée informations de la production Retour d'informations de la clientèle sur produits antérieurs Informations de la recherche (technologie, concept…)
Industrialisation	Qualification Industrialisation	Remontée informations de la production sur prototypes Retour d'informations de la clientèle sur produits antérieurs Informations « achats » sur les fournisseurs
Validation	Accord pour production	Remontée informations de la production sur prototypes Informations « achats » sur les fournisseurs
Production		

2-Le dossier d'industrialisation

Il peut comprendre à titre d'exemple :

– les gammes de fabrication et de contrôle ;
– le plan de surveillance relatif :
    - aux caractéristiques du produit ou des sous-ensembles en cours de production et au stade final,
    - aux paramètres du processus,
    - à l'équipement du poste de travail,
    - aux fiches d'enregistrements ou saisie de données ;
– le suivi des moyens de contrôle (maintenance, étalonnage) ;
– le dossier d'ordonnancement ;
– la description des moyens de production ;
– la liste d'outillage et leur description ;
– le plan de maintenance de la production.

● **Les preuves**

Parallèlement, il peut être souhaité de fournir un certain nombre de preuves sur :

– la validité des choix techniques et industriels ;
– la qualité du produit ;
– la démonstration que les contraintes de fabrication sont prises en compte.

● **Les phases et les sorties**

Si nous allons plus dans le détail, de chaque phase doit sortir un certain nombre de données qui sont les entrées de la phase suivante.

Le tableau 4.8 donne des exemples de types de données.

4.5.8 Rédaction d'une procédure

Bien que la norme ISO 9001 n'impose aucune procédure sur la gestion du projet, l'expérience montre qu'il est quasi indispensable que tous les points que nous venons d'examiner soient définis dans une procédure écrite.

Tableau 4.8 Données de sortie

Phase	Revue	Sorties
Études de marché		L'étude du marché des objectifs de prix, délai, quantités un budget global
Préparation	Initialisation	Des objectifs précis et détaillés sous forme : – d'un Cahier des charges fonctionnel (CdCF) – de la formation des « équipes projet » de développement – des budgets – d'un planning
Faisabilité	Point 0	Des maquettes de faisabilité Des choix stratégiques (technologies, composants, industrialisation) La démonstration de la faisabilité sur le plan technique et sur le plan commercial Le plan qualité Un budget détaillé Des orientations de prix et de planning de développement
Études	Qualification Définition	Des maquettes faites hors outils industriels Les spécifications définitives du produit Le dossier produit La nomenclature des sous-ensembles, composants et matières Les plans Les spécifications des composants et matières Le programme de qualification des composants Les études de fiabilité prévisionnelle La définition des moyens de production Les résultats qualité sur maquettes Un planning définitif Une estimation du prix

Tableau 4.8 Données de sortie (fin)

Phase	Revue	Sorties
Industrialisation	Qualification Industrialisation	Des prototypes Le dossier de fabrication Les moyens de production et de contrôle Les instructions et modes opératoires de fabrication et de contrôle Les gammes de fabrication Les résultats qualité sur prototypes Les résultats de qualification des composants et fournisseurs. Le prix définitif
Validation	Accord pour production	Des produits faits avec des composants définitifs et sur des équipements définitifs La documentation commerciale (documents d'information, mode d'emploi, documents d'après vente…). Les résultats qualité sur produits. Les vérifications commerciales (sur le terrain). Les résultats qualité complets (notamment fiabilité).
Production		

4.6 Organisation en groupe de projet

Ce type d'organisation est à conseiller, mais malheureusement pas toujours possible. Le principe consiste à former pour chaque projet un groupe sous la responsabilité d'un chef de projet. Chaque service concerné détache une ou plusieurs personnes dédiées à ce projet ou programme. Parfois, une personne ne sera affectée au projet que pour une part seulement de son temps, comme illustré dans le tableau suivant (*Voir Tableau 4.9)*.

La plus grosse difficulté est, pour une entreprise de taille modeste, de trouver des personnes pouvant assumer la fonction de chef de projet (il peut appartenir à n'importe quel service). En revanche, dans les grosses entreprises, on peut créer un pool de chefs de projet dont le métier est de piloter des projets.

Cette fonction implique de maîtriser :

– la conduite de projets ;

– la technique du produit autant que possible ;

– la gestion ;
– la logistique ;
– les aspects financiers ;
– les techniques de la qualité.

Tableau 4.9 Répartition des personnes par projet

Services / Projets	Marketing	SAV	Bureau d 'étude	Industriali-sation	Méthodes	Achats	Logistique	Production	Qualité
A	0,5	0,2	2	2	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5
B	0,5	0,2	3	1	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5
C	0,3	0,2	2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5
D	0	0,2	1	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5

Une difficulté est également d'assurer une bonne articulation entre chefs de services et chef de projet, en déterminant clairement les rôles respectifs.

Mais ce type d'organisation est très efficace. Elle permet l'amélioration de :

– la connaissance des problèmes, incidents ou anomalies de tous ;
– la rapidité d'information, de réaction, etc. ;
– la motivation des personnes du groupe qui se trouvent mieux impliquées dans le projet ;
– la créativité et l'échange des idées.

Elle simplifie la communication.

4.7 Méthodes de la conception

4.7.1 Ingénierie simultanée ou ingénierie concourante

Le principe est que le développement d'un produit peut aller de quelques mois à quelques années et, dans la compétition actuelle, la réduction de ce temps de développement est devenue un enjeu essentiel pour les entreprises.

La situation la plus fréquente est caractérisée par :

– des temps de développement très longs ;
– un dépassement des délais prévus ;
– des modifications nombreuses en cours de développement, mais surtout en cours de fabrication, entraînant des coûts dont l'importance est toujours sous-estimée.

Par ingénierie simultanée (ou ingénierie concourante), on entend un ensemble de méthodes qui intègrent bien la structure transversale et favorisent au maximum le travail en commun, le travail d'équipe et une planification du travail dans laquelle tous les services opèrent en parallèle.

Ces principes sont en bonne concordance avec la norme ISO 9004.

Cette méthode est très élaborée et nous n'en retenons ici que quelques aspects qui nous paraissent essentiels et les plus faciles à mettre en œuvre.

4.7.2 Planification des tâches en parallèle

Le principe est d'impliquer tous les acteurs le plus tôt possible de façon à anticiper au maximum les actions. Par exemple, le service achats peut orienter sa prospection en fonction des grandes orientations des bureaux d'étude et commencer des négociations sur une base prévisionnelle. On peut amorcer les discussions avec un mouliste de pièces plastiques bien avant que les plans définitifs ne soient réalisés.

Le schéma de la Figure 4.4 montre ce principe. La variation des motifs sur la barre correspondant à chaque service, traduit la densité de l'action.

4.7.3 Partenariat avec les fournisseurs

Il est souhaitable également de transformer profondément la relation avec les fournisseurs en les faisant participer autant que possible à la conception du produit. Il est étonnant de voir à quel point les fournisseurs peuvent apporter des idées, des suggestions sur la conception des produits, les spécifications des composants, la logistique d'approvisionnement permettant d'améliorer la qualité et de réduire les coûts.

La norme ISO 9004 insiste beaucoup sur cette relation dans le paragraphe 6.6 « Fournisseurs et partenariats ».

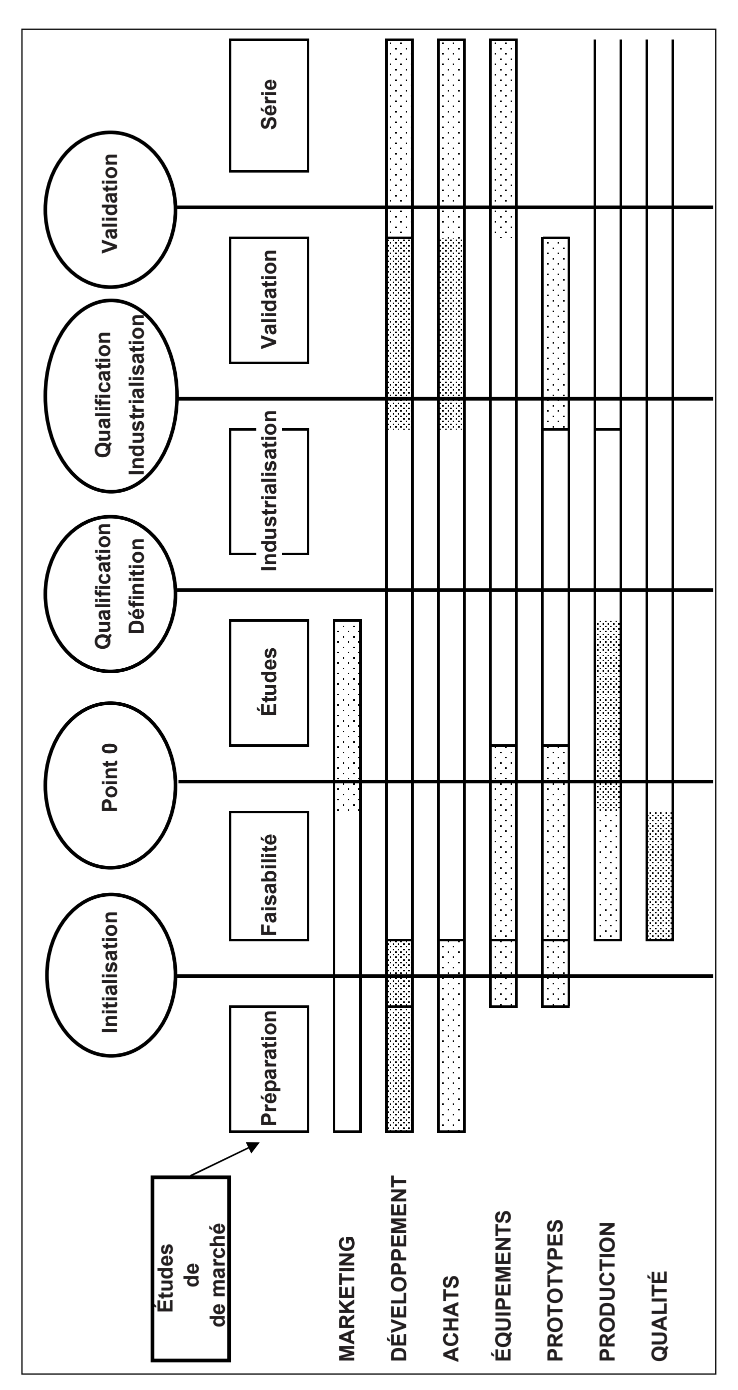


Figure 4.4 Planification des tâches en parallèle

4.8 Techniques qualité de la conception

4.8.1 AMDEC

Cet outil de maîtrise des risques étant assez général, nous avons préféré en faire un chapitre particulier (*Voir chapitre 12*). À la conception il est souhaitable de faire une AMDEC sur :

– **le projet** lui-même : elle traite des risques de défaillances qui pourrait handicaper le projet voire le faire échouer. Cette AMDEC se fait dans la phase de préparation.

– **le produit** : elle traite des risques de défaillances que pourrait avoir le produit en cours de fonctionnement chez le client, éventuellement en fabrication. Elle doit se pratiquer le plus tôt possible dans la conception, à un moment où seuls les plans sont réalisés.

– **le procédé** : elle traite des risques de défaillances que pourrait avoir le procédé de production en cours d'industrialisation.

– **les moyens de production** : elle traite des risques de défaillances que pourrait avoir une machine de production ou de manutention.

4.8.2 Analyse de la valeur – Analyse fonctionnelle

À nouveau, cet outil permettant d'aboutir aux spécifications les mieux adaptées aux besoins avec un rapport qualité prix optimum, a un caractère très général et nous avons préféré en faire un chapitre particulier (*voir chapitre 12*).

4.8.3 Contrôles à la conception

Le thème du contrôle étant également général, nous en avons fait un chapitre spécifique (*Voir chapitre 7*). Nous allons nous limiter ici aux spécificités des contrôles en cours de conception.

● **Responsabilité**

Il est souhaitable que les contrôles de la conception soient pris en charge par les services de développement et d'industrialisation, mais le service qualité rattaché à la direction doit être parfaitement informé et en mesure de décider de l'acceptation ou non du produit.

● Objectif

Pendant les différentes phases du développement du produit, il faut s'assurer que le produit répond aux exigences spécifiées et que le processus de fabrication permettra d'assurer la reproductibilité des résultats.

Les contrôles vont se répartir tout au long de la conception, au fur et à mesure de son avancement et le plus tôt possible, de façon à anticiper rapidement tout problème.

● Spécificités

Les contrôles en conception se caractérisent par la limitation en nombre de produits disponibles puisque l'on ne peut réaliser que des maquettes ou prototypes faits avec des moyens coûteux, les moyens de production n'étant en général pas encore réalisés. Seule la phase de présérie peut permettre de disposer de quantités plus importantes.

De plus, c'est le moment où il faut vérifier autant que possible la totalité des caractéristiques du produit, et notamment tout ce qui concerne la fiabilité

Il s'agit donc dans ce contexte d'optimiser le choix des contrôles en s'appuyant sur le principe du compromis coût/risque. Les études de risques réalisées, en général avec l'AMDEC produit, permettent de mettre l'accent sur le contrôle des points les plus critiques.

● Principes

Les quelques principes suivants vont également nous servir de guide :

- Mettre l'accent sur « les évaluations » que peuvent fournir les contrôles. Par exemple, sur les caractéristiques mesurables, il est souhaitable d'examiner les distributions statistiques ou, pour l'aptitude à respecter les contraintes environnementales (mécaniques, climatiques…), il est bon de faire quelques tests dans des conditions extrêmes au-delà des spécifications.
- Mettre l'accent sur le contrôle de tous les aspects innovants du produit en cours de développement : nouveau concept, nouvelle technologie, nouveau procédé, nouveau composant ou nouvelle matière… Autant l'innovation est utile, autant elle génère une situation de risque d'un point de vue qualité, notamment en matière de fiabilité, voire de sécurité.
- Interpréter avec prudence les résultats des contrôles, sachant que les prototypes, par exemple, ne sont pas nécessairement représentatifs de la production de série.

Dans le cas de produits complexes ou de système, le plan de contrôle doit porter en priorité sur les sous-ensembles (ou mêmes des composants) les plus critiques, sachant que les contrôles sur le produit complet peuvent être trop coûteux, notamment pour les tests destructifs.

Pour la fiabilité, la Figure 4.5 propose une répartition schématique des quantités à contrôler, basée sur le principe suivant : quelques produits testés sur un temps de fonctionnement le plus long possible (donc le plus tôt possible, dans les phases de la conception) et un maximum de produits testés sur courte période, cela pouvant être sur la présérie avant production.

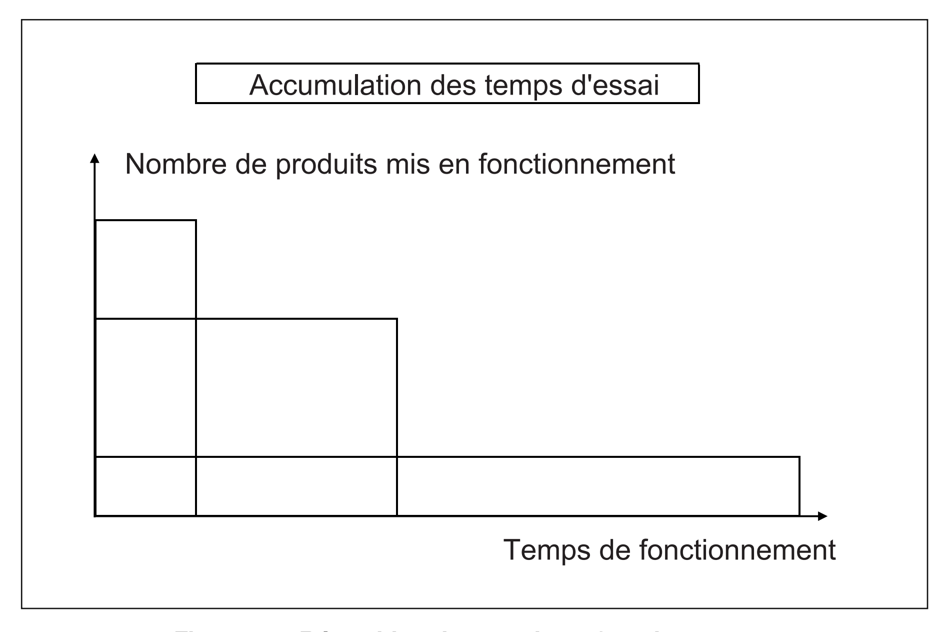


Figure 4.5 Répartition des essais en fonctionnement pour la vérification de la fiabilité

4.8.4 Prise en compte de la fabrication

● **Principe**

Il ne faut pas oublier que le fabriquant est le client direct interne de la conception. Bien sûr, nous savons bien que la conception doit d'abord considérer la satisfaction du client final, mais il faut aussi concevoir des produits :

– faciles à fabriquer ;

– minimisant les risques de défauts (source de réparations ou de mises en rebut) ;
– nécessitant un minimum de manutentions.

C'est une des raisons qui fait que la production doit être intégrée très tôt au projet de conception.

● **Méthodes**

Les points à prendre en compte sont :

– 1- Concevoir un produit en intégrant autant que possible les possibilités de la fabrication. On peut, à la fin de la phase de faisabilité ou, c'est déjà un peu tard, de la phase d'étude, s'assurer que les tolérances des plans sont compatibles avec les capabilités : Cpk du procédé. Nous verrons dans le cadre de la MSP (Maîtrise statistique des procédés) au chapitre 5 ce que représente ce type d'indicateur des caractéristiques mesurables. Disons juste que le Cpk indique l'aptitude d'un procédé à respecter la tolérance fixée. En arrière-plan, il y a à inciter les concepteurs à être très réalistes dans la fixation des tolérances. Bien sûr, en dernier ressort, si la conception du produit implique une amélioration du procédé en cours, il faudra la faire.
– 2- Lorsque la réalisation d'un produit consiste en l'assemblage de plusieurs sous-ensembles ou composants, et ceci est souvent le cas, il est bon de respecter quelques principes. Leur respect peut faire l'objet de vérification systématique à un stade de la conception comme pour le point précédent :
  - Minimiser le nombre de composants. Cela paraît simple à dire mais si l'on fait systématiquement une analyse du produit sous cet angle, on s'aperçoit qu'il y a des possibilités de gains considérables. Le concepteur n'a, bien souvent, pas grande conscience que tout composant supplémentaire est source de coûts (coût du composant lui-même, mais aussi coûts d'achats, de logistique, gestion de la qualité, contrôle, etc.). Citons le DFA (*Design for Assembly*) qui permet une cotation d'un produit en terme de coûts liés au nombre de pièces ou des conditions de montage.
  - Minimiser les surfaces à assembler : il s'agit de concentrer l'activité d'assemblage sur une zone réduite mais également d'éviter de multiplier les zones d'assemblage. Plusieurs surfaces d'assemblage augmentent le coût.
  - Concevoir l'assemblage verticalement : cela consiste à favoriser les assemblages de haut en bas, ce qui permet de bénéficier de la gravité. Il

faut de toute façon éviter les mouvements dans de multiples directions pour poser les composants et surtout éviter des montages en aveugle.

- Concevoir des composants symétriques : plus un composant est symétrique, plus il est facile à manipuler ou à emballer.
- Utiliser des dispositifs anti-erreurs : sur les composants symétriques, l'usage d'un détrompeur est une garantie absolue de ne pas monter un composant à l'envers. D'une façon plus générale, l'usage de « dispositifs anti-erreurs » (Poka Yoke) au montage est d'un apport très grand dans l'organisation d'un poste de travail. Il y a en général un nombre très grand de solutions possibles pour définir de tels dispositifs.
- Optimiser la manutention des composants : par exemple, concevoir des emballages et des conditionnements pour les composants permettant une saisie directe et aisée sur le poste d'assemblage.
- Faciliter l'emboîtement des composants : on peut prévoir des systèmes de guidage soit au niveau du composant, soit au niveau de la surface recevant le composant.
- Éviter de mélanger des technologies différentes : plus la production doit gérer des technologies différentes plus cela augmente les coûts, exige des formations spécifiques ou l'embauche de spécialistes.

● **Proximité**

Il est à noter que cette approche de la prise en compte du fabriquant pour faire de bons produits implique une relation forte entre la conception et la production et donc une certaine proximité !

5

La maîtrise du processus production

5.1 Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication n'est qu'un processus particulier. D'ailleurs nous pensons que le principe de l'organisation de l'entreprise en processus comme exigé dans la norme ISO 9001 provient d'une généralisation du processus de production. Sa cartographie nous paraît un outil indispensable. La description du processus de fabrication doit comprendre :

– les procédures associées ;
– l'utilisation d'outils ou techniques spécifiques ;
– le plan de contrôle ;
– les enregistrements relatifs à la qualité.

Nous allons examiner ces différents points pour mettre en valeur leurs spécificités.

5.2 Procédures

Si nous considérons le terme procédure dans le sens très général de la norme ISO 9001, cela inclut tous les documents qui permettent d'en régir son fonctionnement tels que « instructions de fabrications », « modes opératoires », « consignes », « gammes », « plans et gammes de contrôle »… autant de documents qui prennent des noms différents selon les entreprises, n'existant aucune normalisation sur ce plan à notre connaissance. Tous ces documents concernent la production dans son régime de croisière. Mais nous souhaitons mettre en valeur deux procédures concernant le lancement de la production :

– procédure de lancement d'une nouvelle production ;
– procédure de redémarrage de production.

Dans ces procédures, une attention particulière est portée sur des points tels que :

– l'état des postes de travail, leur équipement, les appareils de contrôle ;
– un contrôle plus poussé sur les premiers produits ;
– un contrôle des paramètres de production relatifs aux équipements ou aux matériels de production ;
– la vérification que le personnel affecté aux postes de travail a bien les compétences requises.

5.3 Outils et techniques

Il existe de nombreux outils ou techniques. Nous nous limitons à citer celles qui nous paraissent les plus intéressantes.

5.3.1 Grille de compétences

Il est souhaitable de disposer d'une grille de compétence du personnel de production établie en général par le service des ressources humaines. Il doit y avoir adéquation entre les compétences du personnel telles que décrites dans ce document et les compétences nécessaires pour chaque poste de travail.

5.3.2 AMDEC du procédé et des moyens de production

Avant le lancement, dans une optique de prévention des risques, l'AMDEC, tant sur le procédé que ses moyens de production, est un excellent outil pour

répondre à cette exigence. Nous traitons de ce point plus généralement dans le chapitre 12 sur la prévention des risques.

5.3.3 Méthode 5 S

N'ayant pas de compétence particulière sur ce sujet, nous ne faisons qu'en évoquer le principe. Cette méthode nous paraît très intéressante. Nous l'évoquons dans le contexte de la production mais elle est conçue pour être généralisée à l'ensemble des services l'entreprise.

La gestion de la qualité implique de la rigueur, de l'ordre et de la propreté. Comme à leur habitude les Japonais ont traduit ces bons principes en une méthode structurée qu'ils ont appelée les 5 S. Chaque S est le début d'un mot japonais que nous pouvons traduire par :

- Trier ;
- Ranger ;
- Nettoyer ;
- Conserver en ordre et propre ;
- Formaliser et impliquer.

Certaines entreprises mettent cette méthode au cœur de leur plan d'amélioration de la qualité.

5.3.4 Systèmes anti-erreurs

Ils sont appelés parfois « Poka Yoké », mais nous ne voyons pas l'intérêt d'utiliser ce terme japonais car il s'agit d'une méthode occidentale connue et appliquée en France depuis très longtemps. Les dispositifs « anti-erreurs » ou les détrompeurs n'en sont qu'un aspect limité.

5.3.5 Kanban

Encore un terme japonais décrivant un approvisionnement des postes de travail en « Juste-à-temps ».

5.3.6 Changement rapide d'outil

Il s'agit des techniques qui permettent de changer rapidement un outil de production pour passer par exemple d'un modèle à un autre. Ce sujet fait l'objet

de techniques très élaborées que nous n'aborderons pas et prend toute son importance dans un contexte de « juste à temps ».

5.3.7 Maîtrise statistique des procédés (MSP) ou *Statistical Process Control* (SPC)

Cette méthode particulièrement intéressante est très élaborée. Nous en avons donc fait un paragraphe spécifique de ce chapitre (*voir paragraphe 5.4*).

5.3.8 Contrôles et responsabilités pendant la phase de production

Nous avons consacré un chapitre spécifique (*voir chapitre 7*) à la théorie du contrôle, auquel le lecteur pourra se reporter. Nous n'abordons ici que les aspects spécifiques du contrôle en production.

Pendant la phase de production normale, les contrôles sont traditionnellement organisés selon la Figure 5.1.

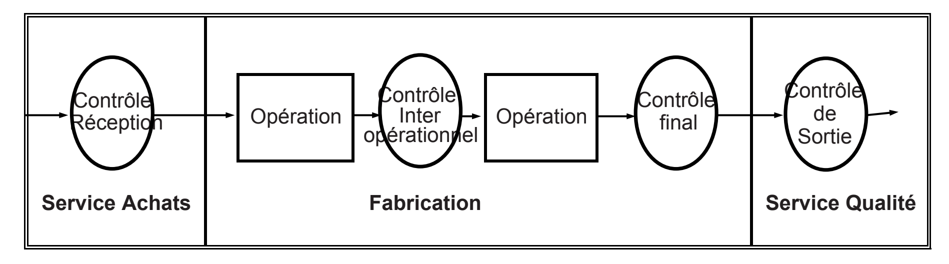


Figure 5.1 Les contrôles de la production

Nous distinguons :

- **Le contrôle réception**, dont la responsabilité est confiée selon les entreprises à la production, au service qualité ou aux services achats. Cette dernière solution a notre préférence car elle place le service achat devant ses responsabilités, mais n'est pas toujours réaliste. Nous avons fait quelques commentaires ou recommandations sur le contrôle réception dans le chapitre concernant les achats et approvisionnements.
- **Les contrôles interopérationnels** qui s'adressent aux produits aux différents stades de production. La responsabilité de ces contrôles est le d'une façon quasi générale confiée à la production.
- **Les contrôles relatifs aux paramètres du procédé** naturellement sous la responsabilité de la production.

– **Le contrôle final de production** dont la responsabilité est également confiée à la production.
– **Le contrôle de sortie** confiée au service qualité qui en répond devant la direction.

L'attribution des responsabilités s'inspire du principe de l'auto-contrôle. Examinons les spécificités de chacun de ces contrôles.

5.3.9 Contrôles interopérationnels et contrôle final de production

● **Objectif**

Le but est de s'assurer, en continu, que les produits restent conformes aux spécifications. Pour cela, ces contrôles ont deux objectifs majeurs :

– éliminer les non-conformités qui pourraient survenir tout au long du procédé de fabrication ;
– stabiliser le procédé et corriger rapidement toute dérive.

Les caractéristiques concernées sont en général exclusivement celles correspondant à la **qualité initiale du produit**. La **fiabilité** du produit dépend essentiellement des choix de la conception et la production est impuissante à la vérifier ou encore moins à rendre fiable un produit qui ne l'est pas par conception. Par exemple, si le produit comprend un assemblage de pièces réalisé par un soudage et que ce choix se traduit par un taux de défaillances excessif en clientèle, la production ne sera pas en mesure de détecter cette anomalie. Il nous faut cependant distinguer deux aspects :

– Si les composants n'ont pas le niveau de fiabilité suffisant la production ne peut rien faire.
– Si l'opération de soudage est mal exécutée, cela peut entraîner ce que l'on appelle une « défaillance de jeunesse » en clientèle. C'est-à-dire que le produit est conforme (en apparence) en production, alors qu'il a un défaut potentiel qui ne se révélera que plus tard en clientèle. Dans ce cas, la production doit s'assurer que l'opération de soudage est convenablement menée (température correcte, personnel formé, bon aspect des soudures, poste de travail équipé convenablement, etc.) mais ne sera pas en mesure de détecter ces défaillances potentielles, sauf procédures lourdes comme on le verra plus loin.

● **Contrôle des produits et des paramètres**

Le plan de contrôle tout le long de la production ne peut pas se faire séparément d'un plan de contrôle plus général incluant le contrôle des paramètres du procédé.

Par exemple, si une opération de dépôt d'une couche d'aluminium se fait par un flash sous vide, mieux vaut s'assurer systématiquement de la qualité du vide, de l'intensité du courant électrique provoquant le flash, que de l'épaisseur d'aluminium déposé.

Il s'agit d'optimiser le choix des contrôles en s'appuyant sur le principe du compromis coût/risque décrite dans le chapitre sur le contrôle. En général, les études de risques faites avec les AMDEC « procédé » et « moyen de production » permettent de mettre l'accent sur le contrôle des points les plus critiques.

● Élimination des non-conformités

Elle ne peut se faire que par des contrôles unitaires (100 %).

Outre le choix des points à contrôler, il faut optimiser la place du contrôle le long du procédé de fabrication. Il faut placer les contrôles (s'ils s'avèrent nécessaires) le plus en amont possible, c'est-à-dire juste après l'opération où le défaut a été créé. En effet, lorsque l'on avance dans le procédé, le produit prend de la valeur ajoutée en passant d'une opération à l'autre. Si le contrôle est réalisé en fin de production, son élimination coûte le prix maximum, qu'il faille le détruire ou le réparer. Mais là encore, tout est question d'optimisation, car une telle façon de faire risque d'entraîner une multiplication des postes de contrôle.

De même, le contrôle peut se faire globalement par un test fonctionnel sur le produit ou analytiquement sur chacun des composants ou des sous-ensembles : tout dépend des situations particulières et des coûts.

● Élimination des « défaillances de jeunesse »

Nous avons évoqué ce point au sujet des objectifs des contrôles de production.

La solution consiste à faire un « déverminage », c'est-à-dire un contrôle après avoir soumis les produits à des contraintes simulant en accéléré les conditions d'utilisation du produit de façon à faire apparaître les défaillances de jeunesse en production plutôt que chez le client.

Par exemple, un cycle de vibration peut révéler une soudure mal faite. La difficulté est de trouver les bonnes contraintes à exercer, pas trop fortes pour ne pas fragiliser le produit, mais suffisamment pour faire apparaître la défaillance. À noter qu'il ne s'agit pas d'un rodage.

Cette méthode est très coûteuse et ne peut s'appliquer que sur des produits professionnels à haute exigence de fiabilité.

5.3.10 Traitement des informations de production

Les résultats de contrôles des produits aux différents stades, ainsi que les relevés des paramètres, doivent être enregistrés pour traitement. C'est indispensable pour corriger et améliorer le procédé de fabrication.

Le schéma suivant (*Figure 5.2*) montre le principe d'ensemble. Le problème à traiter comprend trois aspects :

– saisir l'information ;

– la traiter ;

– procéder aux actions de prévention, de correction et d'amélioration.

La saisie et le traitement posent un problème économique difficile. Dans les cas les plus simples, on peut se limiter à un simple tableau manuel d'enregistrement au poste de travail ou de contrôle. Dans les cas les plus élaborés, on procède à la saisie automatique de tous les résultats de contrôle et de tous les paramètres de production faisant l'objet d'un suivi ; et ces informations sont traitées systématiquement ou à la demande dans un système informatique. Un tel système assure la traçabilité de chaque produit en cours de production et permet d'associer une non-conformité à ses conditions de production.

Le tableau 5.1 présente un exemple de saisie et de traitement simple et manuel. On enregistre au poste de contrôle le nombre de défauts et l'opération présumée responsable.

Tableau 5.1 Exemple de feuille de relevé de défauts

Résultats de contrôle après l'opération 7 pour le jour J						
Opération responsable	**Défaut 1**	**Défaut 2**	**Défaut 3**	**Défaut 4**	**Défaut 5**	**Défaut 6**
Opération 1	3					
Opération 2						
Opération 3			5			
Opération 4	2					
Opération 5				4		
Opération 6						
Opération 7	6		4		2	5
Total	**11**	**0**	**9**	**4**	**2**	**5**

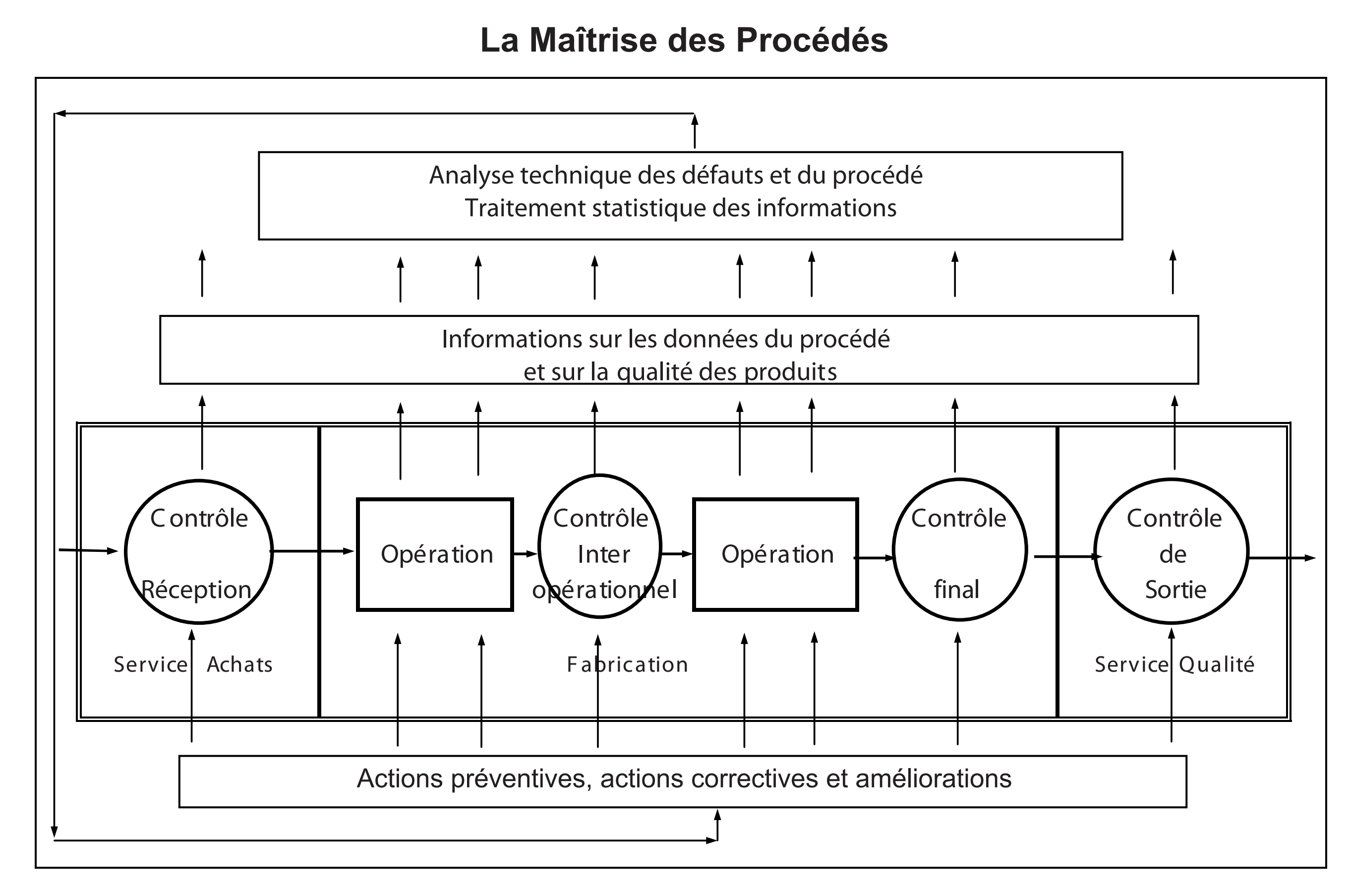


Figure 5.2 Processus d'amélioration

5.3.11 Contrôle de sortie

Il peut paraître étrange de faire un tel contrôle en sortie avant livraison des produits alors que la fabrication a effectué les contrôles que nous venons d'examiner. Mais l'objectif est différent. Le contrôle de sortie a pour but de s'assurer que le niveau de qualité des lots prêts à être livrés au client est conforme au niveau requis. De plus, il est fait pour le compte de la direction sous la responsabilité du service qualité. La confiance que l'on a dans les contrôles effectués par la production n'exclut pas de vérifier que le résultat attendu est atteint.

Le contrôle de sortie a les caractéristiques suivantes :

- Il porte d'une façon quasi générale sur les lots de produits et est fait par échantillonnage avec l'utilisation des tables NF ISO 2859-1.
- Les caractéristiques contrôlées doivent être assez nombreuses mais toujours dans une optique de bon rapport coût/risque. Les points contrôlés doivent aller au-delà de ce que contrôle la production. Cela peut concerner des points nécessitant un contrôle destructif. Les caractéristiques de fiabilité avec notamment les tests d'environnement peuvent faire l'objet de contrôle avec une périodicité faible par exemple une ou deux fois par an. On pourrait s'étonner de contrôler la fiabilité à ce stade, pensant qu'elle a été vérifiée lors de la conception, mais c'est oublier que la conception n'a permis le contrôle que d'un nombre limité de produits. D'autre part, une éventuelle dégradation a pu se produire suite à un changement voulu, avec parfois les meilleures intentions. Ce changement peut également être accidentel, chez les fournisseurs ou se produire en production.
- L'accent doit être mis sur **l'évaluation du niveau de qualité** et sur le processus **d'actions correctives** car la sélectivité des contrôles par échantillonnage est faible et ce n'est pas l'objectif majeur de ces contrôles.

5.3.12 Prévention

Nous avons beaucoup parlé des contrôles de production mais cela ne doit pas nous faire oublier que, s'ils sont nécessaires, les actions de prévention sont capitales.

5.4 Maîtrise statistique des procédés (*Statistical Process Control*)

5.4.1 Principes et définitions

La « Maîtrise statistique des procédés » est parfois plus connue sous son appellation « *Statistical Process Control* » et son sigle SPC.

Le principe de la « Maîtrise statistique des procédés » consiste à faire très fréquemment des prélèvements d'une quantité assez réduite de produits pour s'assurer que ses différentes caractéristiques restent dans les tolérances et, s'il advient que ce n'est pas le cas, à intervenir immédiatement pour corriger la situation. Les résultats sont reportés sur une « carte de contrôle » qui fixe les limites que doivent respecter les échantillons prélevés pour la caractéristique considérée (*voir un exemple de carte au paragraphe 5.4.7 de ce chapitre, avec suivi de la moyenne et de l'écart type*). Ces contrôles peuvent concerner le produit à tous ses stades de production : des composants au produit fini en passant par les sous-ensembles.

5.4.2 Importance de la méthode

Souvent la MSP est présentée comme la simple mise en place de cartes de contrôle pour surveiller quelques caractéristiques. Cela donne l'impression d'un travail assez réduit et simple. La réalité est tout autre. Il faut distinguer deux phases :

- Une phase d'étude et de modifications du procédé préalable à la mise en place de la carte de contrôle. Celle-ci demande une organisation structurée, un travail conséquent qui peut aboutir à des modifications du procédé, des investissements, des formations, etc.
- Une phase de mise en place de la carte de contrôle qui est très simple, demandant un travail plutôt réduit.

Cette première phase est directement dépendante des produits concernés. Si un produit est simple et a un nombre limité de caractéristiques à suivre, la tâche sera réduite. Mais si l'on considère un produit plus complexe, il peut nécessiter un suivi de nombreuses caractéristiques auxquelles il faudra ajouter celles des sous-ensembles voire des composants fabriqués par l'entreprise. Cela peut comprendre **plusieurs centaines** de caractéristiques. Bien sûr, le premier travail, comme nous le verrons, consiste à sélectionner les caractéristiques à suivre en se fixant des priorités. Même après sélection, il peut en rester quelques dizaines voire plus de cent.

Notre intention n'est pas de faire peur et de limiter l'usage de la MSP, mais bien au contraire, de montrer que si son intérêt est grand, elle impose d'en faire un projet à part entière avec un pilotage organisé. Certaines entreprises en font un projet clé dans l'objectif d'améliorer la qualité mais plus encore de réduire substantiellement des coûts de production et de service après-vente. C'est un investissement qui peut être important mais certainement rentable.

5.4.3 Domaine d'application

Cette méthode peut s'appliquer à tout type de production, plutôt de grande série mais peut convenir également pour des petites séries.

5.4.4 Pilotage de la MSP

Compte tenu de l'importance d'un projet MSP, nous pensons indispensable la mise en place d'un groupe de pilotage répondant directement à la direction. Son rôle est de :

- sélectionner les caractéristiques à suivre ;
- lancer des groupes de travail pour chacune des caractéristiques sélectionnées ;
- suivre l'avancement des groupes ;
- prendre les décisions de modifications concernant le procédé et ses systèmes de mesure, d'investissement, de formations, etc.

5.4.5 Guide MSP

Nous proposons un guide (*voir paragraphe 5.4.6*) pour l'étude d'une caractéristique. Ce guide montre bien que la méthode implique à ces différentes étapes l'utilisation de calculs statistiques, tant dans la phase d'étude que dans celle de construction de la carte.

Nous allons en analyser les différentes étapes et apporter les compléments qui ne peuvent pas figurer dans le guide.

● 1- Choix des caractéristiques à mettre sous contrôle et gestion du projet

Ceci relève du groupe de pilotage. Nous proposons une méthode des « critères de choix » pour faire cette sélection. Ensuite, il faut mettre en place un groupe de travail sur chaque caractéristique retenue (ou une seule personne pour les

cas les plus simples). Il faut lancer un nombre limité de groupes pour des questions de charge de travail, ce qui signifie que l'étude peut durer relativement longtemps.

● 2- Justification des tolérances ou limites

L'expérience montre que l'on fonctionne avec des tolérances sur les caractéristiques qui ne sont pas toujours bien fondées. En conséquence il ne sert peut-être à rien de lancer une étude coûteuse qui n'aurait pas lieu d'être.

● 3- Vérification documentaire

Un audit du procédé pour la partie concernée par l'étude est une sage précaution. Nous avons vu parfois que cette simple remise en ordre peut déjà améliorer la qualité.

● 4- Étude du système de mesure (ou d'observation pour les caractéristiques par attribut)

L'expérience nous a montré qu'en cas de système de mesure élaboré, le calcul de la reproductibilité ou de la justesse réservait de grandes surprises. Certains dispositifs se révélant parfaitement inaptes à assurer une précision compatible avec la plage de tolérance à respecter.

● 5- Étude de la population (étude la « Typologie » du procédé)

Une bonne connaissance historique de la vie du procédé pour la caractéristique concernée est indispensable pour l'étape suivante. Une instabilité du procédé telle que montrée sur la figure 5.3 est très riche de renseignement.

Il nous faut définir la notion de capabilité :

« L'indice de capabilité est une mesure de l'aptitude d'un procédé à respecter la tolérance prescrite pour une caractéristique donnée. »

Le principe de calcul consiste à comparer :

– l'intervalle de tolérance T de la caractéristique matérialisée par :
  - T_S : la limite supérieure de tolérance,
  - T_I : la limite inférieure de tolérance ;
– à la plage qui comprend la majorité des résultats de la production.

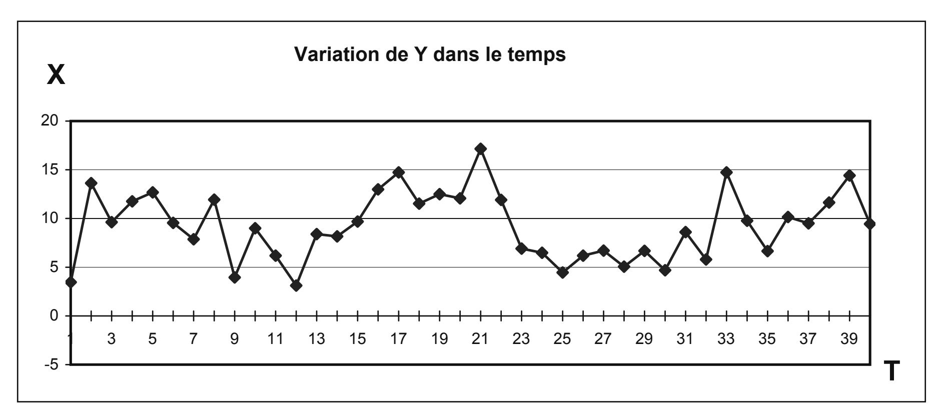


Figure 5.3 Évolution dans le temps

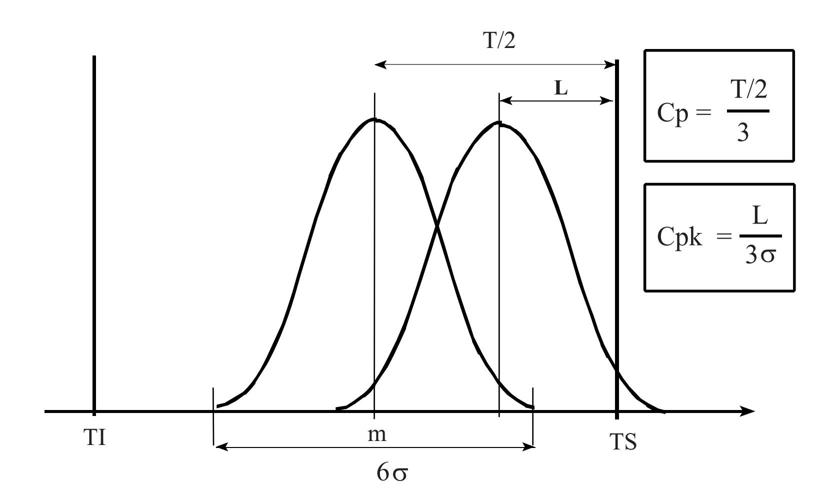


Figure 5.4 Comparaison de la loi de la caractéristique *x* à la plage de tolérance

Par convention, cette plage est définie par ± 3 σ autour de la moyenne soit 6 σ en admettant que la loi de distribution de *x* est une loi de Gauss (loi normale) d'écart type σ. Pour une loi normale, la probabilité de se trouver dans les limites de ± 3 σ est de 99,7 %. (*voir chapitre 10 sur le traitement statistique des données*).

On définit :

L'indice de capabilité *Cp* : $Cp = \frac{T}{6\sigma}$ avec $T = T_s - T_i$

L'indice de capabilité fonction de *k* *Cpk* :

Si la moyenne *m* est décalée vers la droite d'une valeur $\Delta x = k \times T/2$ (*k* représentant un taux de décalage de la moyenne) :

$$Cpk = \frac{L}{3\sigma} \text{ avec } L = T_s - m$$

Si la moyenne m est décalée vers la gauche la formule est la même mais avec $L = m - T_i$.

Cp représente la qualité que le procédé serait capable de fournir si l'on était en mesure de régler en permanence la moyenne de *x* exactement sur la valeur nominale (valeur au centre de la plage de tolérance).[6]

Il y a une équivalence entre le taux de produits hors tolérances que l'on exprime en ppm[7]. Nous voyons bien que par définition un *Cpk* de 1 correspond à la situation où $L = T_s$ (ou T_i) – m est égal à 3 σ. Or cela donne une référence ; C'est un niveau de qualité à la limite de l'acceptable car un moindre décalage de la moyenne m se traduirait par beaucoup de hors tolérance. En conséquence il faut *Cpk* nettement supérieur à 1. Une valeur de 1,33 est bien, 1,50 excellente.

Tableau 5.2 Équivalence *Cp*, *Cpk* et taux de hors tolérances

Cp* ou *Cpk	**Proportion de défauts en ppm pour *Cp***	**Proportion de défauts en ppm pour *Cpk***
0,66	45 600	22 800
1,00	2 700	1 350
1,17	480	240
1,33	64	32
1,50	7	3,4
1,66	0,5	0,3
2,00	0,001	

On définit également la capabilité machine. Elle porte sur les résultats d'une période suffisamment courte pour que les sources d'hétérogénéité n'aient pas pu varier (changement d'opérateurs, de lots de matières, de conditions

6. Notons que $Cpk = Cp(1 - k)$. Si $k = 0$, $Cpk = Cp$.
7. ppm : parties par million (mieux adapté qu'un pourcentage pour exprimer de faibles taux de défauts).

climatiques, etc.). Et bien sûr, s'il y a plusieurs machines en parallèle on ne s'intéresse qu'aux résultats d'une seule machine.

On note les indices de capabilité :

- *Cm* : indice de capabilité machine ;
- *Cmk* : indice de capabilité machine fonction de *k*.

De notre point de vue, le calcul de *Cm* et *Cmk* ne présente pas un intérêt majeur. Ils indiquent cependant que si *Cm* et *Cmk* sont plus petits que leurs équivalents *Cp* et *Cpk* il y a encore dans le procédé des sources de variation dans le temps.

● 6- Recherche des facteurs responsables d'une capabilité insuffisante

Ce travail de fond nécessite l'emploi de techniques statistiques. Il peut être nécessaire de prévoir une formation.

● 7- Plan d'amélioration

C'est la partie la plus difficile et en général la plus chère. Mais c'est à ce niveau que la MSP apporte beaucoup.

● 8- Actions correctives

L'ensemble des études menées à ce stade nous donne une connaissance suffisamment bonne du procédé de fabrication pour que nous puissions déterminer les corrections à apporter pour corriger les dérives éventuelles lorsque nous serons en phase opérationnelle avec la carte de contrôle. On les appelle traditionnellement les OCAP (*Out of Control Action Plan*). Elles peuvent prendre les formes suivantes :

- rechercher de la cause de variation et y remédier. On s'efforce de prédéterminer la liste des causes possibles et la façon de les rechercher ;
- régler la moyenne en agissant sur un facteur prédéterminé ;
- réviser la machine ;
- changer un accessoire.

Une formation du personnel à l'interprétation de la carte est indispensable.

Les actions correctives réalisées doivent être reportées dans le journal de bord. On y enregistre tous les faits notables : incidents, changement de lot, changement d'équipe ou d'opérateur, modifications du procédé...

Ce journal de bord sera très précieux pour la recherche des causes lors d'une évolution anormale du procédé. Il permettra également d'enregistrer les actions correctives appliquées.

● 9- Création de la « Carte de contrôle »

En principe à ce stade le procédé est maîtrisé et en corollaire il est présumé stable et respectant une loi de Gauss s'il s'agit d'une caractéristique mesurable.

Il y a différents types de carte de contrôle selon que l'on s'intéresse à :

– une caractéristique mesurable ; dans ce cas on va suivre un paramètre de centrage (moyenne, médiane, mode…), un paramètre de dispersion (écart type, étendue…) ;
– une caractéristique par attribut (dans ce cas on va suive une proportion, une quantité de défauts, etc.).

Dans un souci de simplification, nous allons présenter le cas le plus fréquent et sans doute le plus utile : la « carte *m*, *s* » (suivi de la moyenne et de l'écart type).

Nous avons peu parlé du cas des caractéristiques par attribut. Si les phases d'analyse et de recherche d'amélioration nous semblent très utiles, dans ce cas en revanche, l'utilisation de la carte est d'un intérêt moindre.

Calcul des limites pour une carte suivant la moyenne *m* et l'écart type *s*.

On définit pour chaque paramètre suivi (moyenne, écart type) :

– LSC : Limite supérieure de contrôle ;
– LIS : Limite inférieure de contrôle.

Pour les écarts type, la limite inférieure ne présente pas d'intérêt pratique.

Le calcul des limites s'obtient en appliquant les principes des tests d'hypothèse : c'est-à-dire que lorsqu'un point dépasse une limite, on estime que l'hypothèse « le paramètre n'a pas évolué » n'est plus acceptable, mais ceci avec un seuil de confiance bilatéral à 99,7 % (1,5 ‰ de chaque côté).

Les limites se calculent à partir d'une table :

Limite de la moyenne :	$LSC = N + A_3 \times s$
	$LIC = N - A_3 \times s$
Limite de l'écart type	$LSC = B_4 \times s$

La table (*Voir Tableau 5.3*) permet de faire les calculs si au lieu de l'écart type on suit l'étendue *R* (*R* : différence entre les valeurs maxi et mini de l'échantillon.). On utilise alors les coefficients A_2 et D_4.

La colonne de droite donne le coefficient d_n qui permet d'estimer l'écart type *s* à partir de l'étendue *R*.

Tableau 5.3 Table pour le calcul des limites des cartes de contrôle

n	A_2	A_3	B_4	D_4	d_n
	m, R	m, s	s	R	$s = R/d_n$
2	1,880	2,659	3,267	3,267	1,128
3	1,023	1,954	2,568	2,574	1,693
4	0,729	1,628	2,266	2,282	2,059
5	0,577	1,427	2,089	2,114	2,326
6	0,483	1,287	1,970	2,004	2,534
7	0,419	1,182	1,882	1,924	2,704
8	0,373	1,099	1,815	1,964	2,847
9	0,337	1,032	1,761	1,816	2,970
10	0,308	0,975	1,716	1,777	3,078
11	0,285	0,927	1,679	1,744	3,173
12	0,266	0,886	1,646	1,717	3,258
13	0,249	0,850	1,618	1,693	
14	0,235	0,817	1,594	1,672	
15	0,223	0,789	1,572	1,653	
16	0,212	0,763	1,552	1,637	
17	0,203	0,739	1,534	1,622	
18	0,194	0,718	1,518	1,608	
19	0,187	0,698	1,503	1,597	
20	0,180	0,680	1,490	1,585	
21	0,173	0,663	1,477	1,575	
22	0,167	0,647	1,466	1,566	
23	0,162	0,633	1,455	1,557	
24 25	0,157	0,619	1,445	1,548	
	0,153	0,606	1,435	1,541	

Nos formules ne sont pas tout à fait conformes à ce que l'on lit dans la littérature : au lieu de N on trouve m expérimental, au lieu de s on trouve la moyenne des s calculés sur une suite d'échantillons prélevés au cours de l'étude préalable. Ceci n'est pas tout à fait compatible avec la démarche proposée dans le guide.

Choix de la fréquence *f* et du nombre de produits à prélever *n*.

Plus le coût du contrôle est élevé, plus on sera contraint de limiter la fréquence f des prélèvements et le nombre n de produits de l'échantillonnage. Plus la caractéristique est importante plus il faut les augmenter.

Nous traduisons ceci par une formule symbolique :

$$n \times f = \text{Fonction} \left(\frac{\text{Importance de la caractéristique}}{\text{Coût du Contrôle}} \right)$$

La fréquence de prélèvement dépend de :

– l'instabilité du processus. L'étude du procédé nous aura permis de découvrir s'il présente des risques d'instabilité ou si au contraire les évolutions éventuelles sont lentes ou peu probables ;

– la cadence de production. Pour des questions de risque il est clair que plus la cadence de production est grande plus il faut faire des prélèvements fréquents sinon en cas de dérive constatée un nombre de produits trop important risque d'avoir été fabriqués entre deux échantillons.

Nous traduisons à nouveau ces deux idées par une formule symbolique :

$$f = \text{Fonction (Instabilité} \times \text{Cadence de Production)}$$

De ces formules nous tirons les deux tableaux suivants (*Tableaux 5.4 et 5.5*) qui sont des exemples à adapter pour chaque entreprise. On construit la partie gauche à partir des graphiques de droite. Par exemple, un prélèvement de 20 produits peut correspondre à une caractéristique d'importance moyenne et un coût de contrôle important.

● 10- Rapport

Chaque groupe de travail doit consigner ses conclusions au fur et à mesure de l'avancement de l'étude afin de conserver en mémoire les connaissances acquises.

● 11- Présentation et mise en place

Dans le cadre du pilotage du projet MSP, il est bon que chaque groupe de travail présente ses conclusions devant le groupe de pilotage. Cela peut être

l'opportunité de faire décider par le management des travaux ou investissement à entreprendre.

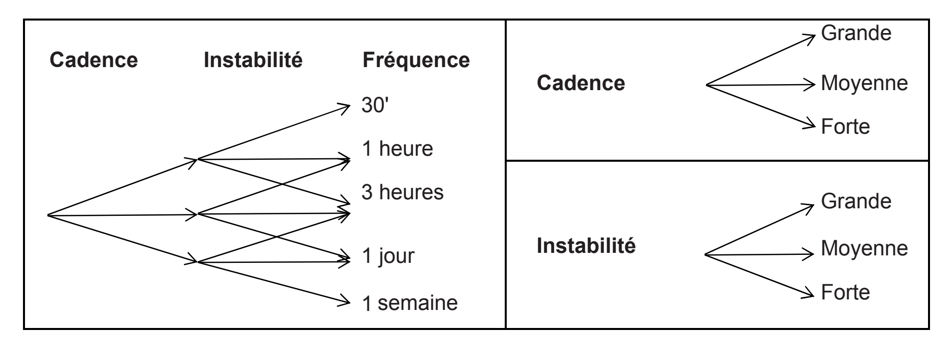


Tableau 5.4 Détermination de la fréquence

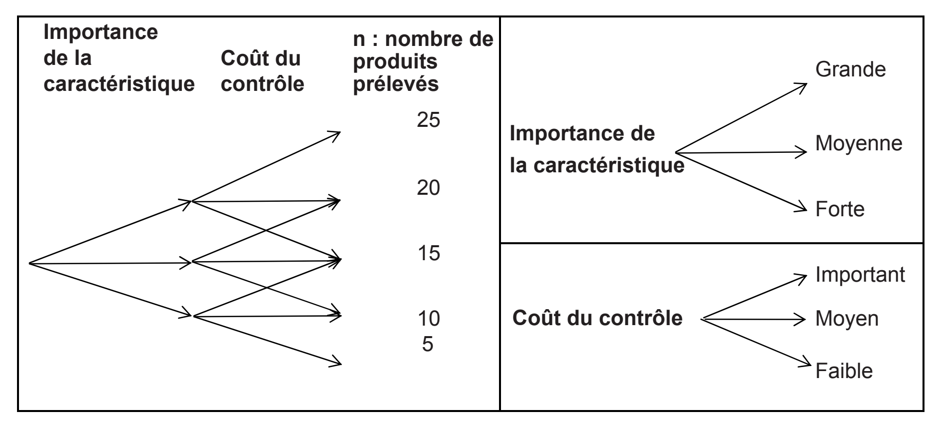


Tableau 5.5 Détermination de la quantité *n* à prélever

5.4.6 Guide méthodologique

(Voir Tableau 5.6.)

5.4.7 Exemple de carte de contrôle

Le tableau suivant (*voir Tableau 5.7*) représente une carte de contrôle avec :

– suivi de la moyenne et de l'écart type ;
– $n = 5$;
– f à déterminer.

Tableau 5.6 MSP - Guide méthodologique

Étapes	Actions	Techniques à utiliser	Support
1 Choix des caractéristiques à mettre sous contrôle et gestion du projet Ceci relève d'un groupe de pilotage	1.1 Sélectionner les caractéristiques à traiter en MSP	Méthode des critères de choix ; Critères possibles : – coûts de non-conformité – taux retours clients – impact client – impact sur flux de production – difficultés ou opportunité à traiter la caractéristique	Chapitre « travail en groupe »
	1.2 Lancer et assurer le suivi des groupes de travail	Gestion de projet	
2 Justification des tolérances ou limites	2.1 S'assurer que les tolérances sont réalistes		
3 Vérification documentaire	Vérifier l'existence et le respect des : – instructions de fabrication, – modes opératoires, – documents techniques, – consignes – etc.	Audit procédé	

Tableau 5.6 MSP - Guide méthodologique (suite)

Étapes	Actions	Techniques à utiliser	Support
4 Étude du système de mesure (ou d'observation pour les caractéristiques par attribut)	4.1 Examiner le principe de mesure ou d'observation pour s'assurer de sa pertinence 4.2 Vérifier l'existence et le respect des : – modes opératoires de mesure ou d'observation – étalonnages – plan de Maintenance 4.3 S'assurer d'une « sensibilité de la lecture »[8] des appareils de mesure suffisante : au moins 1/10e de la dispersion totale du procédé (que l'on évalue par 6 x σ[9] du procédé)	Audit	
	4.4 Mesurer la « fidélité » (R & R[10]) et rechercher les facteurs (Opérateurs, Temps, Produits…) - Si la fidélité est insuffisante (5 x σr > 10 % de la plage de tolérance T, σr étant l'écart type mesurant la reproductibilité) : – Lancement d'un plan d'amélioration – Validation (mode opératoire, fidélité)	Analyse de la variance à deux (ou trois) dimensions	Chapitre « Incertitude de mesure »

8. On appelle la sensibilité la capacité du dispositif de mesure à permettre la lecture avec un nombre de décimmales suffisant
9. σ : écart type.
10. R&R pour Répétabilité Reproductibilité.

Tableau 5.6 MSP - Guide méthodologique (suite)

Étapes	Actions	Techniques à utiliser	Support
	- Si la fidélité est insuffisante, comprise entre 10 % et 30 % de la tolérance T et que le coût d'un plan d'amélioration est excessif il est possible de compenser en corrigeant les tolérances[11] 4.5 Mesurer la justesse (sauf étalonnage récent)	T remplacé par T-2,5 σr Régression linéaire	
5 Étude de la population (Étude la « Typologie » du procédé)	5.1 Analyser la distribution sur une longue période 5.2 Vérifier la compatibilité avec les tolérances 5.3 Analyse de la stabilité sur une longue période : – variations lentes – variations brutales – cycles – etc.	Histogramme, droite de Henry Calcul C_p, C_{pk} Analyse chronologique Analyse de la variance à une dimension Interprétation graphique des évolutions	Chapitre : « Traitement statistique des données et Management de la Qualité »

11. Mais cela est au détriment du coût consécutif aux produits éliminés à tort.

Tableau 5.6 MSP - Guide méthodologique (suite)

Étapes	Actions	Techniques à utiliser	Support
	5.4 Pour les procédés sujets à accidents (valeurs aberrantes), analyser l'évolution de leur proportion. Si la qualité est satisfaisante (à titre d'exemple[12]) : – $C_{pk} > 1,5$ – p % < 0,2 % Passer directement à l'étape n° 9 (faire carte de contrôle)	Interprétation graphique des évolutions	
6 Recherche des facteurs responsables d'une capabilité insuffisante	6.1 Faire un diagramme Causes-effets	Techniques du travail en groupe	Chapitre « travail en groupe »
	6.2 Valider des causes (choix entre trois méthodes) : 1 approche empirique (fixation des priorités)	Travail en groupe (vote, critères de choix…)	
	2 « Programme de recherche » des données (base informatique) et analyse	Représentations graphiques Comparaison de moyennes **(Anal. de la variance à 1 dimension)** Régression	Chapitre : « Traitement statistique des données et Management de la Qualité »
	3 plans d'expériences	Plans d'expériences	
	Hiérarchiser les causes	Pareto des causes	

12. Selon consigne du groupe de pilotage MSP.

Tableau 5.6 MSP - Guide méthodologique (suite)

Étapes	Actions	Techniques à utiliser	Support
7 Plan d'amélioration	7.1 Définir un programme d'amélioration 7.2 Proposer ce projet au groupe de pilotage 7.3 Valider 7.4 Mise à jour de la documentation	Tableau Causes/Solutions	
8 Actions correctives	8.1 Détermination des consignes (OCAP[13]) – Partir de l'analyse de la population – Bien distinguer : les variations du procédé et les accidents. 8.2 Mise en place du **« Journal de bord »** pour enregistrer les actions correctives réellement effectuées et les causes identifiées quand la carte de contrôle sera opérationnelle	Journal de bord	
9 Création de la « Carte de contrôle »	9.1 Calculer : – les limites – les quantités à prélever – la fréquence des prélèvements	Cartes de contrôle sur moyenne, écart type ou sur p %	

13. *Out of Control Action Plan* : il s'agit de prédéterminer les actions de correction qui devront être faite lorsqu'un point de la carte de contrôle sortira des limites. Ces actions de corrections s'inspirent de l'étude de recherche des causes.

Tableau 5.6 MSP - Guide méthodologique (fin)

Étapes	Actions	Techniques à utiliser	Support
10 Rapport	10.1 Rédiger un rapport (au fur et à mesure de l'avancement) 10.2 Mise à jour des documents de production	Structuré selon les étapes de la MSP avec : – raisons des choix – propositions et décisions – (doit être synthétique et pédagogique)	
11 Présentation et Mise en place	11.1 Présenter devant la hiérarchie et le personnel concerné 11.2 Formation du personnel chargé du suivi	Structurée selon les étapes de la MSP	

Tableau 5.7 La carte de contrôle sur la moyenne et l'écart type

Procédé	Opération	Pièce	Machine	Opérateur	N° de feuille	LCS: LIC:
	Caractéristique	Limites	Unité de mesure	Limite statistique Oui ☐ Non ☐	Fréquence	

Date																												
Lot		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
Nom																												
Mesure	1	20	21	24	20	21	23	20	20	22	18	21	20	20	21	19	20	20	19	20	21	21	20	21	21	22		
	2	18	20	20	19	20	20	21	19	21	17	20	20	19	20	20	21	18	20	20	19	20	20	18	19	20		
	3	23	19	20	21	19	17	20	18	20	20	19	18	21	19	20	21	19	20	18	20	19	22	21	22	19		
	4	20	22	17	18	20	20	19	21	19	20	20	22	20	22	18	20	16	22	20	21	20	19	20	21	21		
	5	19	20	21	20	22	18	22	20	20	21	23	19	23	20	21	19	20	21	22	17	23	20	22	19	20		
Moyenne		20,0	20,4	20,4	19,6	20,4	19,6	20,4	19,6	20,4	19,2	20,6	19,8	20,6	20,4	19,6	20,2	18,6	20,4	20,0	19,6	20,6	20,2	20,4	20,4	20,4		
Ecart-type		1,87	1,14	2,51	1,14	1,14	2,3	1,14	1,14	1,14	1,64	1,52	1,48	1,52	1,14	1,14	0,84	1,67	1,14	1,41	1,67	1,52	1,1	1,52	1,34	1,14		

LSC

$\bar{X}$

LIC

LSC

S

Partie III

Les techniques générales

6

La sûreté de fonctionnement

6.1 Sûreté de fonctionnement : les concepts

6.1.1 Préalable

Le domaine de la sûreté de fonctionnement est extrêmement vaste et complexe, et souvent l'apanage de spécialistes, aussi notre objectif dans ce livre est de rester aussi pratique et simple que possible. Dans ce souci, seuls ses aspects les plus fréquents et utiles seront abordés ici. Ils suffisent toutefois à donner une vision d'ensemble permettant d'aborder bon nombre de problèmes pratiques tels que :

– la rédaction de spécifications ;
– la négociation d'un contrat avec les fournisseurs ou les clients ;
– la prise en compte du sujet pendant la conception des produits ;
– l'exploitation des données en après vente ;
– etc.

mais surtout, nous espérons mettre en évidence l'importance de ce sujet trop souvent négligé.

6.1.2 Concepts de la sûreté de fonctionnement

La notion de sûreté de fonctionnement intègre les concepts de **fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité et invulnérabilité**.

On emploie également, à partir de la première lettre de chacun de ces concepts, les sigles FMDS ou FMDSI, selon que l'on intègre ou non l'invulnérabilité.

Ces termes sont définis dans la norme NF X60-500 et s'inspirent du domaine spatial pour la sécurité et l'invulnérabilité.

Sans reprendre les définitions dans le détail, nous les résumons par quelques mots-clés :

fiabilité[1] :	aptitude du produit à la non-défaillance
maintenabilité :	aptitude du produit à la réparation et au contrôle
disponibilité :	aptitude du produit à l'emploi
sécurité :	aptitude du produit à la non-agression des individus et de l'environnement
invulnérabilité :	aptitude du produit à résister aux agressions malveillantes

Ces différents concepts sont liés, conformément au graphique ci-dessous (*Figure 6.1*) qui met en évidence que la disponibilité d'un produit est fonction de sa fiabilité et de sa maintenabilité.

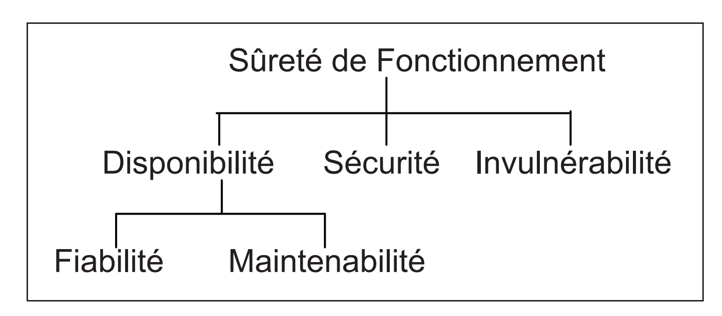


Figure 6.1 Relations entre les différents concepts

6.1.3 Qualité et sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est une **composante** essentielle de la qualité. Ce qui la caractérise est qu'elle concerne le **comportement du produit au cours**

1. La norme X60-500 définit également la durabilité (aptitude à accomplir une fonction jusqu'à un état limite). Dans notre souci de simplification, nous intégrons ce concept dans celui de fiabilité.

de son utilisation, dans le temps, dans la durée, par opposition à **sa qualité initiale**, c'est-à-dire à l'instant de sa livraison ou de son installation. Pour simplifier, la qualité initiale prend en compte les performances du produit au départ avec éventuellement un certain taux de non-conformités alors que la sûreté de fonctionnement prend en compte le maintien ou non de ces performances dans le temps et son bon comportement dans le temps.

Nous constatons que, très souvent, la sûreté de fonctionnement est insuffisamment prise en compte dans le management de la qualité. Elle est souvent oubliée dans les spécifications des produits, absente dans les contrôles, insuffisamment prise en compte dans la conception des produits, etc. Alors qu'elle est essentielle à la satisfaction des clients. Ces manques sont certainement dus à la difficulté inhérente à ce thème. En revanche, on la trouve parfaitement gérée dans des domaines comme l'aéronautique et le spatial, pour ne citer qu'eux.

6.1.4 Fiabilité

● Les deux aspects de la fiabilité

La fiabilité vise à ce que les produits aient un fonctionnement avec un minimum de défaillances, leur assurant ainsi une disponibilité maximum et des frais liés aux réparations *minima* et une durée de vie la plus longue possible, ce qui nous amène à distinguer les deux aspects : la période de vie utile et la période de fin de vie.

● La période de vie utile

Il s'agit de la période normale d'utilisation avec des défaillances à un taux satisfaisant faisant l'objet ou non de réparations.

● La vie utile

Il s'agit du temps au bout duquel les produits sont usés et deviennent difficilement utilisables ou voient leur « taux de défaillances »[2] s'accroître à un niveau tel que leur utilisation devient inexploitable. L'expression « durée de vie » est impropre pour exprimer ce concept.

2. Le taux de défaillances sera défini avec précision au paragraphe 6.2 de ce chapitre.

6.1.5 Maintenabilité

Les aspects à prendre en compte sont du domaine de la facilité de réparation, d'entretien, de contrôle et du traitement du produit en fin de vie.

● La facilité de réparation

La première question à se poser est de savoir si le produit doit être réparable ou non en faisant intervenir des notions économiques ou pratiques. Si le choix est fait de le réparer, la maintenabilité se traduira en termes :

– de coûts de réparation à réduire au maximum ;
– de facilité de réparation, par exemple en ne nécessitant que des équipements simples à utiliser et en rendant accessibles les éléments à réparer avec un minimum d'effort.

Le plus souvent, les coûts dépendront des pièces détachées dont des stocks sont à prévoir et du niveau de qualification du personnel.

● La facilité d'entretien

Là encore, les éléments de coût et de facilité seront à considérer.

● La facilité de contrôle

Ceci correspond à des cas très spécifiques où le produit nécessite d'être vérifié ou étalonné régulièrement.

● Le traitement du produit en fin de vie

Les coûts pour éviter qu'un produit nuise à l'environnement lorsqu'il arrive en fin de vie peuvent être importants.

● L'impact économique

Le coût du cycle de vie d'un produit, depuis sa production jusqu'à sa fin de vie, doit prendre en compte l'ensemble des coûts de maintenabilité qui peuvent être beaucoup plus élevés que le prix d'achat du produit lui-même. Un client avisé en fera un critère de décision d'achat essentiel.

6.1.6 Disponibilité

La disponibilité intègre les deux concepts de fiabilité et maintenabilité. En effet, un produit est indisponible dans la mesure où il est en panne (fiabilité) et en réparation ou en situation de maintenance.

La mesure de la disponibilité est donc assez simple si l'on se réfère au schéma de la figure (*Voir Figure 6.2*) montrant l'alternance de temps de disponibilité Ti et d'indisponibilité représentés en pointillé. La disponibilité sera mesurée par la proportion du temps de disponibilité par rapport au temps total d'utilisation prévue :

$$\text{Disponibilité} = \frac{\sum T_i}{T}$$

Par exemple on peut spécifier dans un contrat qu'une machine doit avoir un taux de disponibilité de 99 % ce qui implique de bien définir ce que l'on entend par période d'indisponibilité.

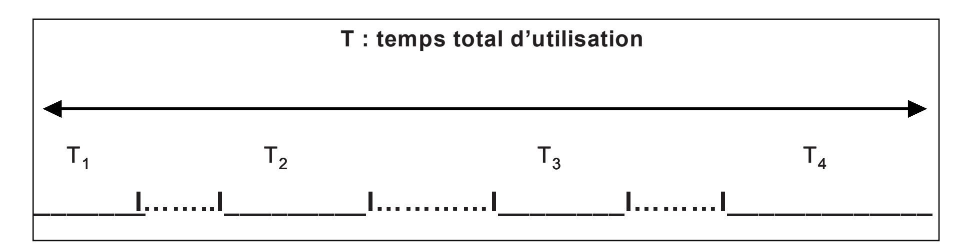


Figure 6.2 Mesure de la disponibilité

On peut affiner le calcul en ne considérant comme temps d'indisponibilité que les périodes où l'utilisateur est réellement privé de l'usage du produit. Par exemple, un produit en cours de maintenance ou de réparation la nuit pourrait ne pas être considéré comme indisponible si son utilisation courante se fait exclusivement le jour.

Notons que le temps d'indisponibilité inclut le temps de réparation ou de maintenance proprement dit, mais également le temps des attentes inévitables ou des transports.

6.1.7 Invulnérabilité

L'invulnérabilité (aptitude du produit à résister aux agressions malveillantes) ne s'applique qu'à des produits exposés à ce type d'agressions : attentats, vandalisme, etc. Il y a autant de solutions que de produits, aussi nous nous contentons ici de donner quelques exemples :

- clavier des cabines téléphoniques qui doivent résister à des chocs violents ;
- sièges de transport en commun qui doivent résister à des coups de couteau ;

– centrales nucléaires qui doivent résister à l'impact d'un avion lancé volontairement sur les installations ;
– blindage de certaines voitures.

6.1.8 Sécurité

La sécurité d'un produit est son aptitude à la non-agression des individus et de l'environnement. Pour l'invulnérabilité, c'est le produit qui est agressé ; pour la sécurité, c'est le produit qui agresse.

Là encore, le nombre de cas est trop vaste pour examiner ici l'ensemble du sujet. L'entreprise doit s'assurer que les produits ne présentent pas de tels risques. Pour cela, des outils d'analyse tels que l'AMDEC est d'un apport fondamental. Cette méthode consiste à rechercher systématiquement les risques de défaillances potentiels et de porter d'autant plus d'effort dans la recherche des solutions que le point détecté est critique. Cette méthode est parfaitement adaptée à la recherche des points critiques en matière de sécurité.

Par ailleurs, ce domaine fait l'objet de très nombreuses normes et réglementations nationales et internationales que les produits doivent respecter.

6.2 Mesure statistique de la fiabilité et ses indicateurs

6.2.1 Objectifs de l'évaluation

L'estimation de la fiabilité d'un produit fabriqué en série peut être nécessaire dans différentes situations :

– en contrôle sur des prototypes durant la conception ;
– en contrôle périodique de fabrication ;
– en contrôle de livraison ou à la réception par le client sur un échantillon ;
– en clientèle à partir des défaillances constatées.

Dans le dernier cas, nous pouvons ne disposer que d'informations remontant de la clientèle sans disposer des produits.

6.2.2 Conditions d'utilisation

La fiabilité d'un produit ne peut s'exprimer qu'en spécifiant les conditions de fonctionnement et d'utilisation. Ce travail est fait au moment de la rédaction des spécifications du produit.

6.2.3 Essais accélérés

Il est souvent nécessaire de faire les essais accélérés c'est-à-dire en augmentant d'une façon contrôlée les contraintes. Cela suppose de connaître pour les produits concernés les « facteurs d'accélération ».

Par exemple, sur un moteur électrique, on peut augmenter la tension et sa vitesse de fonctionnement, l'expérience ou les études théoriques ayant montré l'accélération du temps correspondante.

On peut imaginer par exemple que cet accroissement des contraintes réduira le temps d'un coefficient 10. Ce qui est précieux car la grande difficulté des essais de fiabilité est leur durée. L'accélération peut se limiter à réaliser dans un temps très court ce que le client fait dans un temps très long.

Parfois, on peut simuler la vie d'un composant dans un temps très court.

Par exemple, on peut dans un temps relativement court faire fonctionner un interrupteur un grand nombre de fois correspondant à des années de fonctionnement.

6.2.4 Choix d'une unité de temps

Les différentes mesures peuvent se référer à une durée exprimée en heure par exemple ou en nombres d'opérations ou de cycles. Pour un même produit on peut utiliser plusieurs unités de temps différentes.

Par exemple la vie d'un téléviseur peut être estimée en heure de fonctionnement alors que la vie de son interrupteur sera mieux évaluée par un nombre de cycles.

Nous choisissons en général l'heure de fonctionnement comme unité de temps. L'intérêt de ce choix est que, par exemple, dans un produit qui comprend des composants fonctionnant en continu et d'autres par cycle comme l'interrupteur, on pourra faire des calculs homogènes.

Pour un téléviseur fonctionnant en moyenne **4 heures par jour** et avec un interrupteur manipulé **10 fois par jour**, à 1 000 cycles de fonctionnement correspondront 100 jours soit 400 heures de fonctionnement.

On verra par exemple que les taux de défaillances des composants s'additionnent pour donner le taux de défaillances du produit. Cela implique que l'unité de temps soit la même pour chacun de composants.

6.2.5 Différentes mesures de la fiabilité

Nous allons nous intéresser à la mesure statistique à partir des résultats sans différencier les sources d'information : essais en laboratoire, données en

provenance de résultats en clientèle, etc. Les données de base à exploiter sont, pour chaque produit :

– la défaillance du produit ;
– la date de la défaillance.

Tableau 6.1 Différentes mesures de la fiabilité

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">Catégorie de produits</th></tr>
<tr><th>Catégorie de défaillances</th><th>Non réparables</th><th>Réparables</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Défaillances « catalectiques » : soudaines et complètes</td><td colspan="2">λ : Taux de défaillances
Durée de Vie Utile</td></tr>
<tr><td>R : Fiabilité ou Courbe de survie

Distribution des dates de défaillances : Durée de vie moyenne et écart type

MTTF : durée moyenne avant défaillances

H : taux cumulé de défaillances</td><td>R : Fiabilité pour la première panne

MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement</td></tr>
<tr><td>Défaillance par dérives/usure</td><td colspan="2">Courbes de dérives
« Durée de Vie Utile »</td></tr>
</table>

La norme NF X60-500 : Terminologie relative à la Fiabilité - Maintenabilité - Disponibilité (équivalentes aux normes CEI) nous propose de nombreux indicateurs statistiques. En fait, ces normes donnent une vision très détaillée, très analytique, envisageant un très grand nombre de cas et de situations possibles. Aussi, nous nous sommes efforcés de simplifier beaucoup tout en permettant de traiter la plupart des situations pratiques. Le tableau 6.1 illustre cette simplification.

Ce tableau distingue :

– les catégories de produits :
  - réparables,

  - non réparable : un produit est non réparable lorsque, techniquement, sa réparation est exclue ;

Par exemple, une lampe d'éclairage grillée n'est pas réparable, une plaquette de frein usée non plus. Cette notion est étendue aux produits réparables techniquement mais non économiquement. Par exemple un téléphone peut être réparé mais le coût de réparation peut nous amener à préférer le changer plutôt que de le réparer ;

– la catégorie de défaillances. Parmi le grand nombre de types défaillances proposées par les normes (complètes, partielles, soudaines, progressives…) nous nous sommes limités à :
  - défaillances « soudaines et complètes » (dites « défaillances catalectiques »). Exemple, le pneu crevé d'une voiture (on parlera souvent de panne, même si ce terme ne fait pas l'objet de définition officielle),
  - « défaillances progressives (par dérive) », nous dirons aussi par usure. Exemple : l'usure de la bande de roulement du pneu. Il y a défaillance quand l'usure atteint un niveau excessif à définir.

Dans le cadre de ces différentes catégories sont proposés parfois plusieurs indicateurs. Le choix d'un indicateur se fait alors en fonction du comportement du produit dans le temps.

Par exemple, certains produits ont tendance à tomber en panne au bout d'un certain temps dans un laps de temps assez réduit (cas des lampes d'éclairage classique à filament de tungstène) dans ce cas la « durée de vie moyenne » sera bien adaptée. D'autres tombent en panne d'une façon aléatoire (cas des semis conducteurs) dans ce cas le « taux de défaillances » sera bien adaptée.

6.2.6 Probabilité et résultat expérimental

Nous nous plaçons sur le terrain expérimental (par exemple nous avons constaté que 10 % des produits ont eu une défaillance pendant une période donnée). Mais les résultats correspondent à des lois de probabilité en général bien identifiées (par exemple la probabilité que le produit ait une défaillance pendant une période donnée est de 0,1). Nous allons privilégier le domaine des résultats expérimentaux en évoquant très succinctement celui des lois de probabilité (*Voir paragraphe 6.4*).

6.2.7 Taux de défaillances

Un des meilleurs indicateurs de la fiabilité d'un produit est son « taux de défaillances » que l'on représente par la lettre grecque λ. Son estimation

expérimentale prend une forme différente selon qu'il s'agit de produits réparables ou non réparables.

6.2.8 Taux de défaillances des produits réparables

Dans le cas de produits réparables, on calcule le « taux de défaillances moyen » sur une période donnée comme le rapport entre le nombre de défaillances et le nombre de produits en cours de fonctionnement, ce rapport étant ramené à l'unité de temps.

Examinons le graphique de la Figure 6.3 qui représente $n = 10$ produits fonctionnant pendant un temps $T = 1\ 000$ heures, les croix représentent $k = 3$ défaillances ayant fait l'objet d'une réparation (le temps de réparation est négligé). Le taux de défaillances est calculé par :

$\lambda = k/n \times T = 3/10.1000 = 0{,}0003 = 3.10^{-4}$ défaillances par heure

Il s'agit donc d'un **taux moyen** ramené à l'unité de temps (en général l'heure). Cet indicateur est fondamental dans tout calcul de fiabilité.

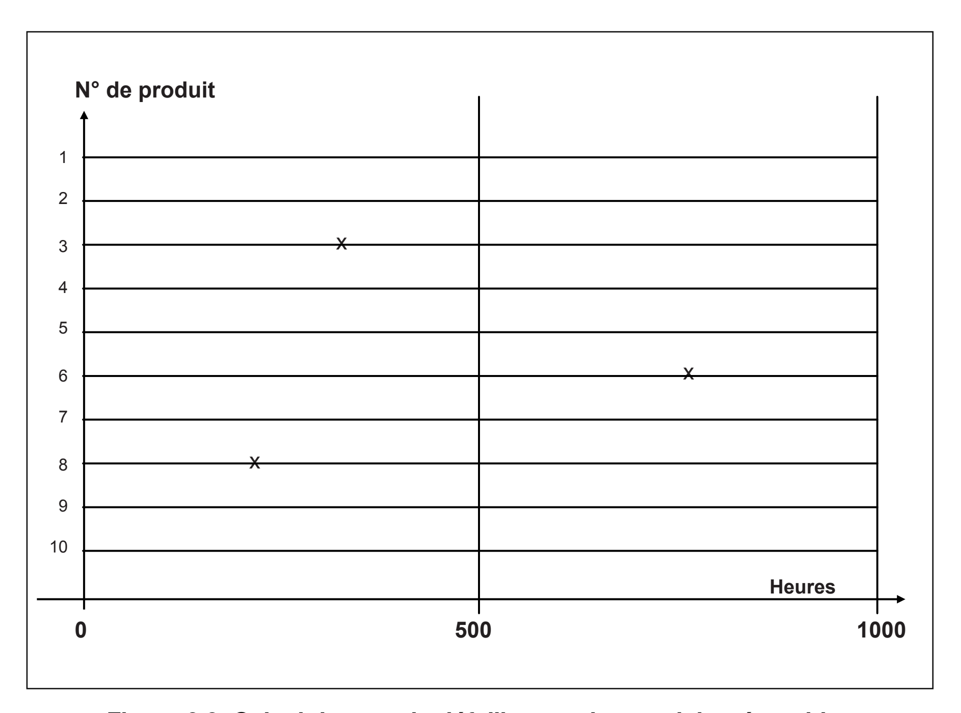


Figure 6.3 Calcul du taux de défaillances des produits réparables

6.2.9 Évolution du taux de défaillances dans le temps

En réalité, le « taux de défaillances » λ, évolue, en général, dans le temps. Le calcul que nous venons de faire nous donnait une estimation du « taux de défaillances **moyen** ». Pour évaluer le taux de défaillances instantané, il faut prendre des plages de temps très courtes, aussi courtes que possible, sachant qu'en général le nombre de défaillances étant assez faible, on ne peut pas prendre des périodes trop courtes.

Examinons les résultats du graphique de la Figure 6.4. Il représente 25 produits réparables ; chaque × correspond à une panne (défaillance). Le temps est exprimé en heure et l'axe du temps est découpé en « classes » de 200 heures. La mise en classe consiste à répartir l'échelle des temps en un certain nombre de classes larges dans notre exemple de 200 heures, et de positionner la date de défaillance au centre de la classe. Les centres de classe ont donc les valeurs 100, 300, 500 heures, etc., allant jusqu'à 5 100 heures et les limites supérieures de classe : 200, 400, 600 heures, etc. allant jusqu'à 5 200 h.

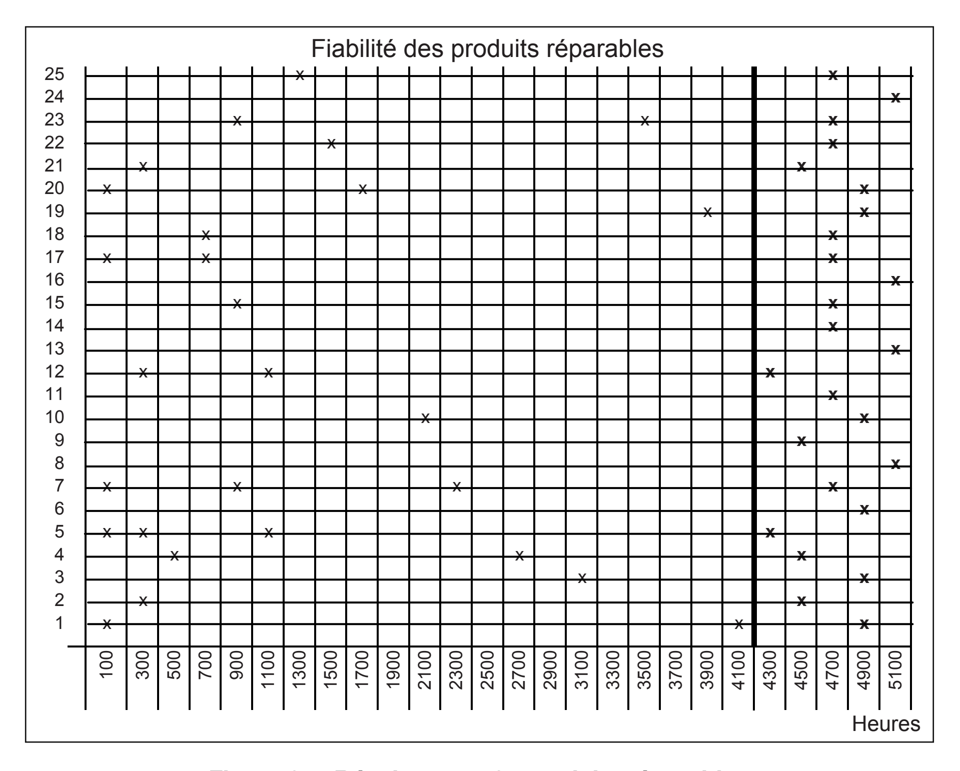


Figure 6.4 Résultats sur 25 produits réparables

Nous avons représenté en gras les défaillances au-delà de 4 200 h pour bien matérialiser la période où manifestement on assiste à un accroissement du taux de défaillances marquant l'apparition de la période de vieillesse.

Nous obtenons le graphique de la figure 6.5 où nous représentons les valeurs du taux de défaillances pour des plages de temps choisies par simple bon sens d'une largeur permettant de donner un certain lissage des résultats. Par exemple, nous avons fait une seule plage allant de 1 000 à 4 000 heures, les variations que nous aurions obtenues avec des plages de 200 heures auraient été illusoires. Nous estimons le « taux de défaillances instantané » pour chacune de ces plages par : $\lambda = k/(N \times \Delta T)$ avec :

- k : nombre de défaillances pour la période ΔT ;
- N : nombre de produits.

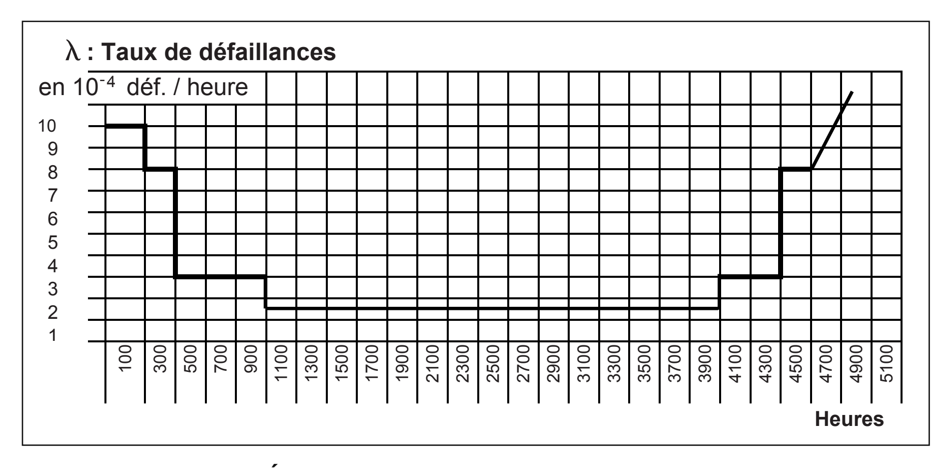


Figure 6.5 Évolution du taux de défaillances dans le temps Cas des produits réparables

La courbe a généralement une forme dite traditionnellement en « baignoire ». Le graphique de la Figure 6.6 représente la loi de probabilité d'un taux de défaillances suivant ce type d'évolution.

Nous distinguons trois périodes bien marquées :

- la période de jeunesse ;
- la période à taux de défaillances constant ;
- une période de vieillesse au court de laquelle le taux de défaillances s'accroît d'une façon importante. La période avant le début de cette montée est dite « période de vie utile ».

Cette forme peut surprendre au premier abord car elle met en évidence que la fiabilité s'améliore en début de vie. Mais cela correspond bien à ce que l'on ressent en général.

Par exemple, lorsque l'on achète une voiture neuve au début de sa vie, on peut observer quelques défaillances correspondant à la « période de jeunesse », puis pendant une période assez longue, on observe peu de défaillances. Et au bout d'un certain nombre d'années, on observe une recrudescence des défaillances montrant que la voiture a atteint une période de « vieillesse » qui peut aller jusqu'à la rendre inapte à assurer sa fonction.

Cette forme est très caractéristique des produits électroniques ou même électromécaniques. Pour des produits mécaniques la partie à λ = constante est assez courte, voire inexistante.

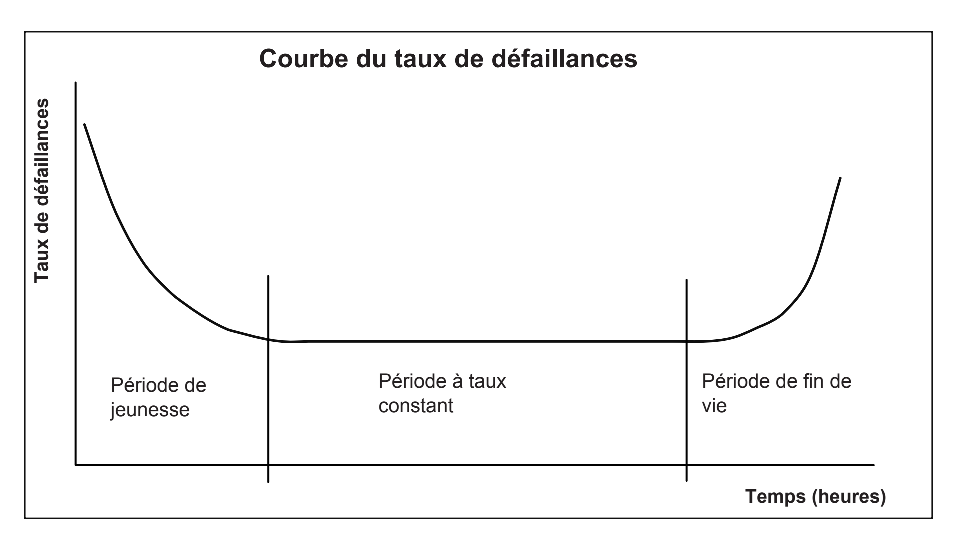


Figure 6.6 La courbe en baignoire

6.2.10 Taux de défaillances des produits non réparables

La notion de « taux de défaillances » peut être étendue au cas des produits non réparables.

La formule de calcul est la même si ce n'est que la quantité N de produits prise en référence pour l'évaluation, pour une plage de temps donnée, est celle des produits encore en vie au début de la plage de temps :

$\lambda = k/[N(t) \times \Delta T]$

– k : nombre de défaillances pour la période ΔT ;

– $N(t)$: nombre de produits restant en début de période.

On voit que le calcul est approximatif dans la mesure où ΔT est grand car en termes de probabilité, il est clair que cette quantité doit diminuer progressivement. Il faut des méthodes plus élaborées que l'on trouve dans les normes citées en référence pour obtenir une estimation plus précise.

Examinons les résultats du graphique de la Figure 6.7. Il représente 25 produits non réparables ; chaque × correspond à une panne (défaillance). Le temps est exprimé en heure et l'axe du temps est découpé en « classes » de 500 heures. La mise en classe consiste à répartir l'échelle des temps en un certain nombre de classes larges (dans notre exemple de 500 heures) et de positionner la date de défaillance au centre de la classe. Les centres de classe ont donc les valeurs 250, 750, 1 250 heures, etc., allant jusqu'à 11 750 heures. et les limites supérieures de classe : 500, 1 000, 1 500 heures, etc., allant jusqu'à 12 000 heures.

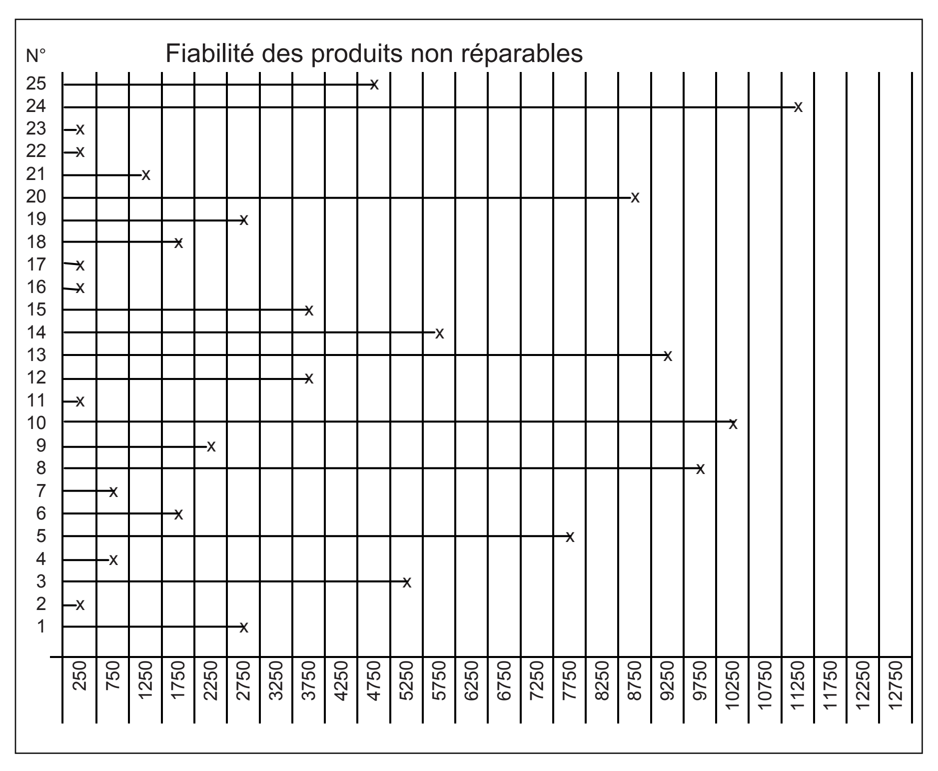


Figure 6.7 Résultats sur 25 produits non réparables

Le tableau 6.2 donne le calcul des taux de défaillances correspondant et la figure 6.8 leur représentation graphique qui suit également une courbe en baignoire.

L'avantage de l'utilisation du taux de défaillance est qu'il se calcule aussi bien sur les produits réparables et non réparables.

Tableau 6.2 Calcul des taux de défaillances par périodes

Période de référence	Nombre de défaillances	Nombre de Produits restant	Durée de la période en heure	λ : taux de défaillances En 10^{-4} défaillances par heure
0 à 500	6	25	500	4,80
500 à 1 000	2	19	500	2,11
1 000 à 2 500	4	17	1 500	1,57
2 500 à 8 500	8	13	6 000	1,03
8 500 à 10 000	3	5	1 500	4,00
10 000 à 11 000	1	2	1 000	5,00
11 000 à 11 500	1	1	1 000	20,00

6.2.11 Courbe de survie des produits non réparables Graphique de Weibull

- **Définition de la fiabilité *R***

La « fiabilité » (noté *R*)[3] d'un produit est « la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné (NF X60-520 : « Prévisions des caractéristiques de fiabilité, maintenabilité et disponibilité »).

R est fonction du temps. On peut donc l'écrire *R* (*t*). On parle aussi de la « courbe de survie » d'un produit.

Cette caractéristique *R* est bien adaptée aux produits « non réparables ». Mais l'étude peut être généralisée aux produits réparables, à condition de ne prendre en compte que la première panne.

3. On peut s'étonner qu'un estimateur statistique porte le même nom que le concept. L'origine en est que les premiers théoriciens de la fiabilité ont imaginé en premier cet estimateur.

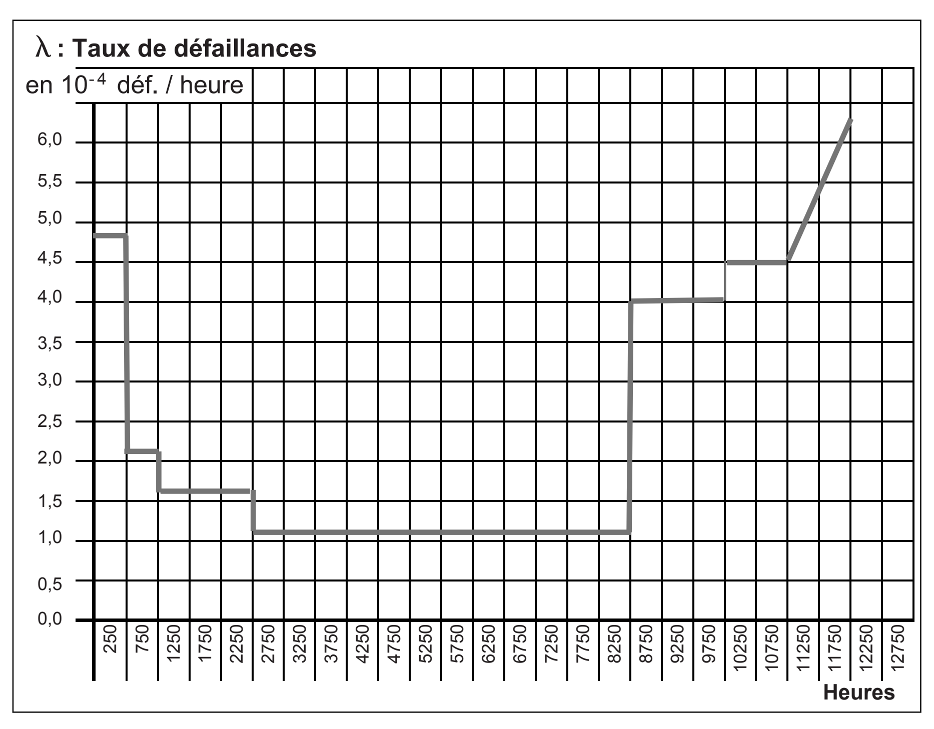


**Figure 6.8 Évolution du taux de défaillances dans le temps
Cas de produits non réparables**

- **Estimation de *R***

La façon d'évaluer la fiabilité est $R(t)$ est très simple. Il suffit de calculer le taux de produits survivants à l'instant t.

$R(t) = (N - k)/N$

N étant le nombre de produits mis en fonctionnement et k le nombre de produits morts à l'instant t. Nous avons fait le choix d'une mise en classe donc le temps t est celui de la limite supérieure de classe. S'il advenait que l'on fasse le calcul en prenant la date exacte de défaillance il faudrait modifier la formule pour avoir une estimation non biaisée :

$R(t) = (N - k)/(N + 1)$

Reprenons notre exemple du paragraphe 6.2.10.

Le Tableau 6.3 présente les calculs de R.

On en déduit la courbe R en fonction du temps (*voir Figure 6.9*).

Tableau 6.3 Calcul de *R* et (1 – *R*)

Classe			*k*	*R*	*R* %	(1 – *R*) %
Entre 0	et	500 h	6	19	76 %	24 %
Entre 500	et	1 000 h	2	17	68 %	32 %
Entre 1 000	et	1 500 h	1	16	64 %	36 %
Entre 1 500	et	2000 h	2	14	56 %	44 %
Entre 2000	et	2 500 h	1	13	52 %	48 %
Entre 2 500	et	3 000 h	2	11	44 %	56 %
Entre 3 000	et	3 500 h	0	11	44 %	56 %
Entre 3 500	et	4 000 h	2	9	36 %	64 %
Etc.						

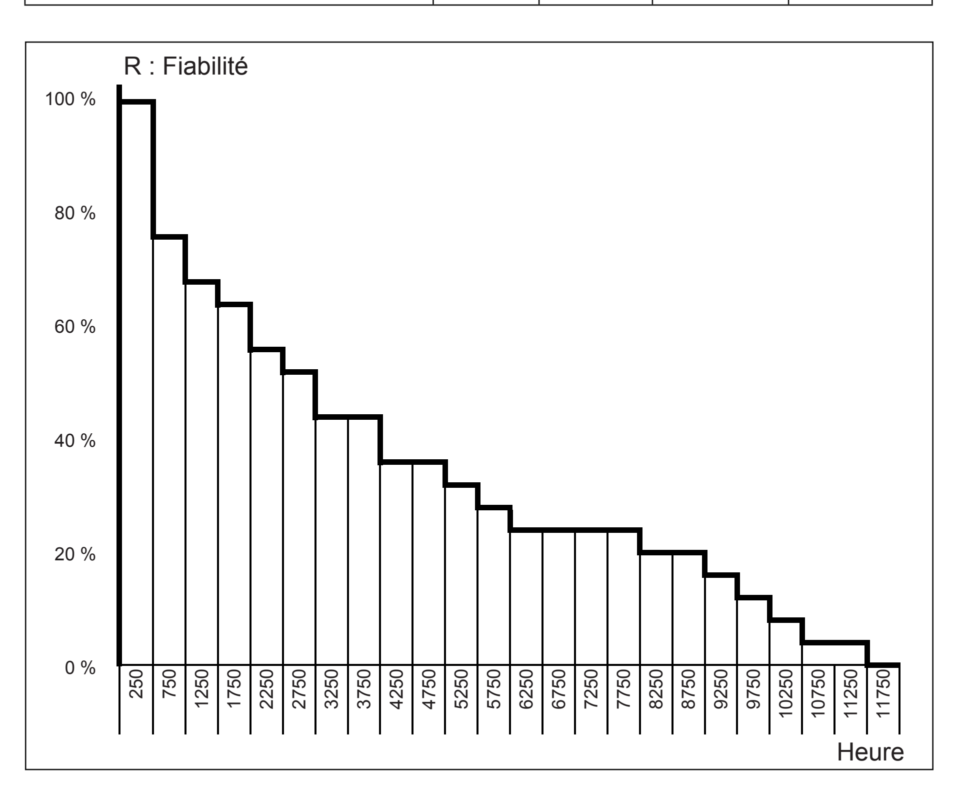


Figure 6.9 R (Fiabilité ou courbe de survie) sur 25 produits

On peut noter que jusqu'à environ 9 000 heures, la forme a une allure exponentielle. Cette forme est assez classique. Après 9 000 heures, on observe un effondrement qui signifie que l'on a dépassé la période de vie utile pour rentrer dans la période de vieillissement.

● Graphique de Weibull

Weibull a mis en évidence que la courbe *R* correspond à un modèle mathématique qui s'applique dans la majorité des cas pratiques. Cela se traduit par le fait que si l'on représente les valeurs expérimentales de $\mathbf{1 - \mathit{R}\ (\mathit{t})}$ en fonction du temps, c'est-à-dire du nombre de défaillances cumulées, sur un papier fonctionnel spécial dit de Weibull, les points s'alignent en général sur une droite, comme on peut l'observer sur la Figure 6.10. Ce nombre de défaillances cumulées s'exprime en % du nombre total de produits.

Cette représentation présente un très grand intérêt. Elle permet des extrapolations dans le temps. Par exemple, si nous avions disposé de données uniquement sur une période de 3 000 heures, nous aurions pu prévoir le comportement des produits sur 20 000 heures. Bien sûr, il y a toujours le risque que le modèle ne se révèle pas juste par la suite. Le fiabiliste doit toujours penser aux phénomènes physiques en jeu pour valider le modèle.

Le graphique permet de déterminer un coefficient β qui correspond à la pente de la droite. Pour cela, on compare la pente de la droite à celle du petit diagramme circulaire qui fait partie du papier de Weibull. Dans notre exemple, cela correspond à environ 0,6. Sans entrer dans les explications mathématiques, l'évaluation de β a un sens très concret :

– Si $\beta = 1$, cela correspond à un « taux de défaillances » λ constant dans le temps. Ce taux est le résultat de la conception du produit, du choix des technologies, des composants, etc. En d'autres termes, la production a peu d'influence sur la valeur du λ.
– Si $\beta < 1$, cela correspond à un « taux de défaillances » λ décroissant, autrement dit le produit présente des défaillances de jeunesse et ceci d'autant plus que le coefficient β est faible. Très pratiquement, les défaillances de jeunesse peuvent être attribuées à un produit mal fabriqué.
– Si $\beta > 1$, cela correspond à un λ croissant dans le temps, autrement dit le produit entre dès le début de sa vie dans sa période de vieillissement. Ceci signifie que le produit a été mal conçu et qu'il n'est pas en mesure de supporter les contraintes auxquelles il est soumis. Là encore, la production n'a pas de possibilité d'améliorer la situation.

On constate qu'à partir de 9 000 heures, la linéarité n'est plus respectée au profit d'une augmentation rapide signifiant, comme on l'avait observé sur le graphique *R* (*t*) que les produits sortent de la période de vie utile pour entrer dans la période dite de vieillissement.

On voit les conclusions très pratiques qui peuvent être tirées d'une telle représentation graphique.

Le graphique de Weibull, rappelons-le, n'est pas adapté au cas des produits réparables. Toutefois, il est possible de l'utiliser dans ce cas à condition de ne considérer que la première défaillance de chaque produit.

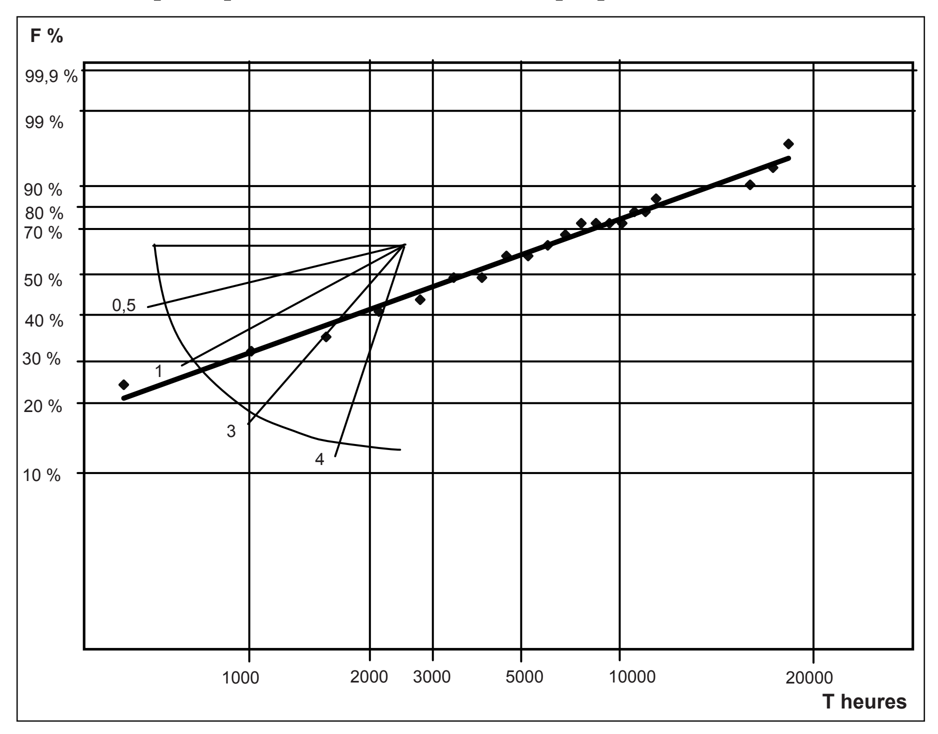


Figure 6.10 Graphique de Weibull

6.2.12 Distribution des dates de défaillances : durée de vie moyenne

● Cas général

Une façon simple d'évaluer la fiabilité pour les produits non réparables est de faire l'histogramme des dates de défaillances. Ceci présente de l'intérêt dans le

cas particulier où les défaillances de produits non réparables sont concentrées sur une période assez courte. C'est le cas, par exemple, des lampes d'éclairage à filament de tungstène. La **moyenne** et éventuellement **l'écart type** des dates de défaillances sont alors deux mesures de la fiabilité tout à fait adaptées à cette situation.

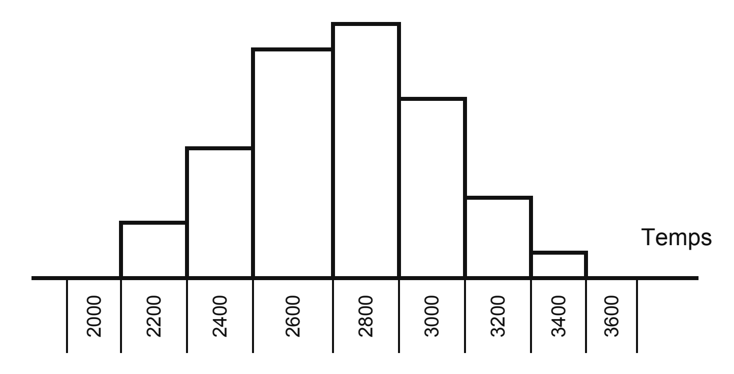


Figure 6.11 Graphique des dates de défaillance de lampes d'éclairage à filament de tungstène[4]

● Période de fin de vie

Reprenons notre exemple des produits réparables (*Figure 6.4*). Nous avons distingué deux périodes :

– Avant 4 200 heures environ, les produits étaient réparables. Le graphique du taux de défaillances de la figure 6.5 était une façon adaptée à l'évaluation de la fiabilité, montrant une diminution puis une stabilisation du taux de défaillances.

– À partir de 4 200 heures environ, nous avions mis en gras les croix indiquant les dates de défaillances, sur la Figure 6.4, pour marquer le fait que les produits arrivant en fin de vie ne pouvaient plus physiquement être réparés. Pour cette période, la distribution des dates de défaillances est bien adaptée à l'estimation de la fiabilité, comme on peut le voir sur le graphique de la Figure 6.12.

L'histogramme montre, comme cela est souvent le cas dans cette situation, que les dates de défaillances suivent une loi de Gauss. Ici, la moyenne est estimée à 4 651 heures et l'écart type à 284 heures.

4. Il va de soi que ces chiffres sont purement imaginatifs.

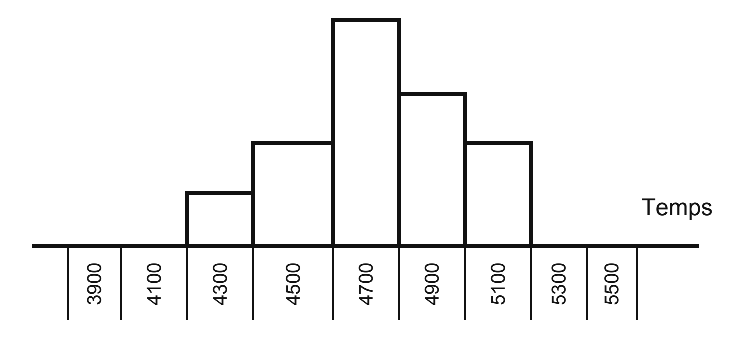


Figure 6.12 Histogramme des dates de défaillances des produits réparables en fin de vie

6.2.13 MTBF

Cet indicateur très souvent utilisé s'appelle en anglais « *Mean Time Between Failure* » en général traduit en français par : « Temps moyen de bon fonctionnement », ce qui n'est pas une traduction parfaitement correcte mais a le mérite d'avoir les mêmes initiales. Les normes donnent comme définition exacte : « Temps moyen de fonctionnement entre défaillances ».

Contrairement au « taux de défaillances », cet indicateur, par définition, ne concerne que les produits réparables.

En fait, il est égal à l'inverse du « taux de défaillances moyen » sur la période considérée.

La définition nous conduirait à prendre tous les intervalles de temps entre deux défaillances (*voir graphique de la Figure 6.4*), mais cela exclurait du calcul tous les produits n'ayant eu qu'une panne ou aucune. En réalité, on pourrait démontrer que la meilleure estimation est :

$$MTBF = \frac{nT}{k}$$

Rappelons que ce calcul n'a de sens que pour les produits réparables. sur la période de vie utile du produit il correspond en fait à l'inverse du « taux de défaillances » moyen sur la période. Il est souvent préféré au λ car il donne une idée assez concrète de la fréquence des interventions sur un produit.

Par exemple une MTBF de 1 000 heures signifie que, en moyenne, le service réparation reverra le produit toutes les 1 000 heures.

À l'inverse il est l'objet de confusion. Certains le confondent avec la vie utile ce qui n'a rien à voir. On voit même des cas où certains parlent de MTBF pour des produits non réparables, ce qui n'a pas de sens.

6.2.14 MTTF

Ce terme anglais *Mean Time To Failure* peut être traduit par « durée moyenne avant défaillance ». Il correspond à la distribution des dates de défaillances telle qu'on l'a vue au paragraphe 2.12 mais la moyenne porte sur des produits qui sont tombés en panne alors qu'une partie est toujours en fonctionnement.

6.2.15 Taux de défaillances cumulé

Nous évoquons pour mémoire ce taux $H(t)$.

Il n'a de sens que pour les produits réparables et est obtenu en cumulant le nombre de défaillances cumulé au bout d'un temps t divisé par le nombre de produits suivis.

Cette méthode d'estimation de la fiabilité est surtout pratiquée en résultats en clientèle.

6.2.16 Papiers à échelles fonctionnelles

Nous avons traité du papier de Weibull. Il existe d'autres modes de présentation qui sont adaptés aux différentes situations. La norme X 60-502 présente en particulier les papiers fonctionnels de Weibull, Johnson, Nelson et Henry.

6.2.17 Dérives ou usures

Bien que cette expression ne fasse pas l'objet d'une définition officielle, le simple bon sens nous invite à estimer les phénomènes d'usure ou de dérive des « défaillances progressives » par la variation dans le temps de la caractéristique matérialisant la dérive ou l'usure.

> Par exemple, l'usure d'une plaquette de frein peut se mesurer par la diminution de son épaisseur ou par celle de l'augmentation de la distance de freinage.

Sur la Figure 6.13, nous représentons une caractéristique ayant baissé de 50 % au bout de 1 000 heures. La courbe correspond à la moyenne des dérives obtenues sur quelques produits. Parfois, on encadre la courbe d'un intervalle correspondant à, par exemple, plus ou moins deux fois l'écart type ou une plage comprenant 90 % des résultats.

6.2.18 Durée de vie utile

Ce terme n'est pas défini directement dans les normes mais correspond à une notion essentielle, notamment dans la rédaction des contrats de fiabilité. Il s'agit

du temps pendant lequel la plupart des produits d'un modèle donné restent ou doivent rester dans un état de fonctionnement correct. Comme nous l'avons déjà dit, il existe un temps au-delà duquel les produits ont vieilli au point que le « taux de défaillances » devient important et/ou les pièces ont atteint des degrés d'usure entraînant beaucoup de difficultés à l'usage des produits. Tout le monde a fait l'expérience d'une voiture qui rentre dans une spirale de pannes, réparation, usure, etc. L'expression « durée de vie » définie dans la norme n'est pas appropriée car elle concerne un produit et, dans un lot de produits, certains peuvent avoir une durée de vie courte et d'autres longue.

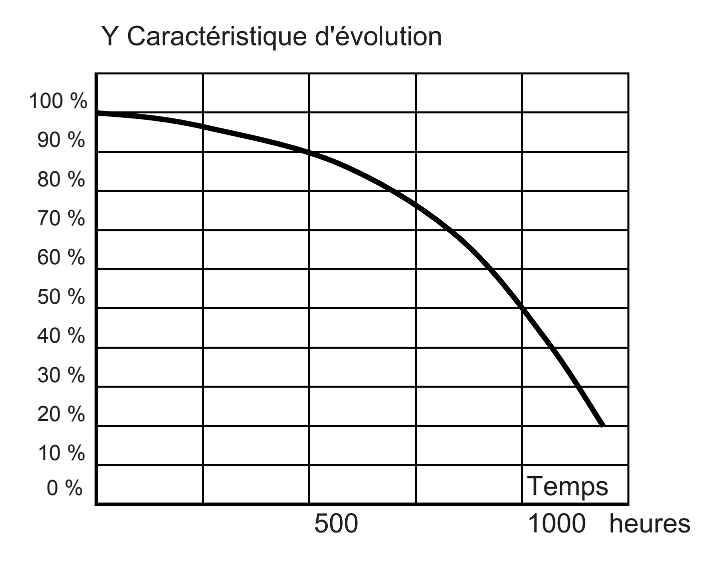


Figure 6.13 Représentation d'une dérive ou usure

6.3 Aspects spécifiques de la fiabilité en mécanique

On note les caractéristiques suivantes :

– il existe très peu de tables de taux de défaillances pour des composants standards ;

– les conditions d'utilisation sont souvent spécifiques à chaque utilisation ;

– les taux de défaillances sont rarement constants ; la courbe en baignoire a une forme de type parabolique ;

– les défaillances sont en général progressives (dérive, usure).

On s'intéresse donc de très près aux mécanismes de défaillances et à leurs conditions d'apparition : déformation, rupture, frottement, fatigue, corrosion, etc. En revanche, il existe de nombreuses tables permettant d'estimer ces phénomènes de vieillissement.

La démarche classique consiste à faire en sorte que pour chacun des points considérés, la distribution statistique des contraintes soit inférieure à la distribution statistique de la résistance à la contrainte du produit.

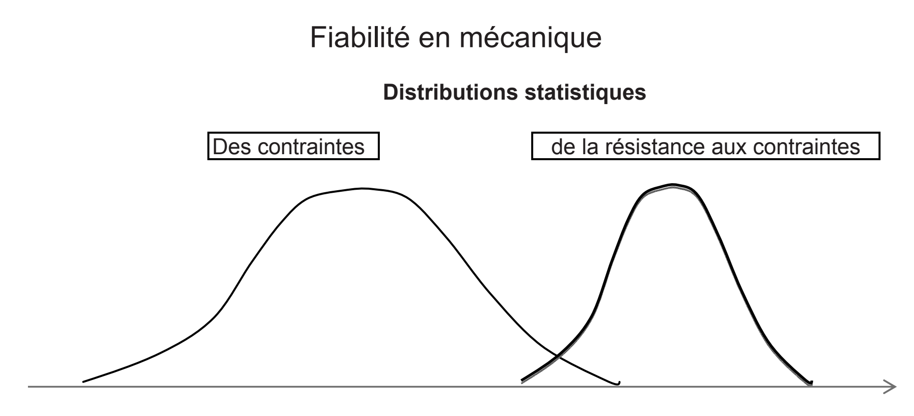


Figure 6.14 Fiabilité en mécanique

6.4 Aperçu sur les lois statistiques de la fiabilité

Nous avons indiqué que le comportement des produits dans le temps répondait à des lois de probabilité dont voici les principales (*Tableau 6.4*).

Ces formules montrent que $f(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$ et $H(t)$ se déduisent l'une l'autre. Ce qui confirme bien que le choix d'un indicateur, comme nous l'avons dit, est opéré en fonction du comportement des produits dans le temps. On choisit l'indicateur qui est le mieux adapté pour représenter ce comportement.[5]

5. Cela amène quelques fois des confusions. Par exemple, la loi λ = Cte pourra être dite loi exponentielle. Il s'agit bien de la même chose mais dans le premier cas, on parle de λ, dans le second, de la fiabilité R.

Tableau 6.4 Formules de base de la fiabilité

Nom	Formule théorique	Estimation
La fiabilité : (Probabilité de survie à l'instant t)	$R(t)$	$R(t) = N(t)/N(o)$ – $N(t)$: nombre de produits restant à l'instant t. – $N(o)$: nombre de produits au temps 0
Taux (instantané) de défaillances Nombre de défaillances	$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \times \frac{dR(t)}{dt}$	Produits non réparables : $\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t+\Delta t)}{N(t)} \times \frac{1}{\Delta t}$ Produits réparables : $\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t+\Delta t)}{N(0)} \times \frac{1}{\Delta t}$ $\overline{\lambda(t)} = \frac{\text{Nombre de défaillances}}{\sum \text{Temps de fonctionnement}}$
Densité (instantanée)	$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt}$	$f(t) = \frac{\Delta N(t)}{N(0)\Delta t}$
Espérance de vie	$E(t) = \int_0^{\infty} t \times f(t)dt$ $E(t) = \int_0^{\infty} R(t)dt$	Durée de vie moyenne des dates de mort quand tous les produits sont défaillants

Tableau 6.4 Formules de base de la fiabilité (fin)

Nom	Formule théorique	Estimation
Taux cumulé de défaillances	$H(t) = \int_0^t \lambda(u)du$	$H(t) = \sum \frac{1}{N(t)}$ Si la loi est de Weibull *H* (*t*), représenté sur un papier Log Log est une droite
Loi exponentielle	λ= Constante $R(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t}$	
Loi de Weibull	$R(t) = \mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$ $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	Estimation de η et β en portant sur un papier de Weibull : *F* (*t*) = 1 – *R* (*t*)

6.5 Fiabilité d'un système en fonction de ses composants

Soit un système (un produit) formé de plusieurs composants.

Soit R_i la fiabilité de chacun des composants, i allant de 1 à I (I étant le nombre de composants) et R la fiabilité du système.

Examinons deux situations.

- **Le système est défaillant si un seul de chacun des composants est défaillant**

Si les défaillances de chacun des composants sont indépendantes entre elles, on obtient pour la fiabilité du système :

$R = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots R_{\mathrm{I}}$

Si tous les R_i suivent une loi exponentielle (λ_i = constante, $R(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t}$) alors R suit une loi exponentielle :

$$R(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t} = \mathrm{e}^{\Sigma_1^I \lambda_i}$$

En conséquence si le taux de défaillances des composants est constant alors le taux de défaillances du système est constant et :

$$\lambda = \Sigma \lambda_{\mathrm{i}}$$

- **Le système est défaillant à la seule condition que tous les composants sont défaillants : la redondance**

Les calculs sont un peu plus complexes mais raisonnant sur le cas pratique le plus fréquent de **deux composants**. Dans un temps très court, Δ_t le taux de défaillances est approximativement le produit $\lambda_1 \lambda_2$ des deux composants en supposant que si l'un des composants est défaillant, il est rapidement réparé.

C'est le principe de **la redondance** que l'on emploie quand un composant a une fiabilité insuffisante. Si ce composant tombe en panne, un autre prend la relève. On voit l'efficacité très grande de cette façon de faire en prenant l'exemple de $\lambda_1 = \lambda_2 = 10^{-5}$ défaillances par heure (qui est un taux relativement médiocre) ; on obtient $\lambda = 10^{-10}$ défaillances par heure ce qui est remarquable.

6.6 Mesure statistique de maintenabilité et disponibilité et leurs Indicateurs

6.6.1 Mesure de la maintenabilité

Une façon simple de mesurer la maintenabilité est :

- le temps et le coût moyens de remise en état en cas de défaillance ;
- le temps et le coût moyens de maintenance systématique.

Les coûts sont eux-mêmes fonction :

- du temps passé ;
- du niveau de compétences du personnel ;
- des pièces détachées à changer.

Les normes définissent un grand nombre d'indicateurs relatifs au temps ; les principaux sont :

- Temps moyen de réparation (TMR) ; en anglais : *Mean Repair Time* (MRT) ;
- Temps moyen avant remise en service (TMRS) ; en anglais : *Mean Time To Restoration* (MTTR).

On voit à cette occasion une nuance importante entre le temps de réparation lui-même et le temps avant remise à disposition du produit.

Un aspect difficilement mesurable mais cependant important en conception est la « facilité » de réparation ou de maintenance. Cette facilité dépend de l'accessibilité des différentes parties du produit et de la complexité relative à changer un composant, que ce soit pour les réparations ou pour la maintenance. Cette facilité se retrouve en partie dans le temps de réparation et de maintenance.

6.6.2 Indicateurs de disponibilité

Le taux de disponibilité s'exprimera sous forme d'un pourcentage.

$$\text{Disponibilité} = \frac{\text{Temps total} - \text{Temps d'indisponibilité}}{\text{Temps total}}$$

Par exemple si une machine a :

- un taux d'indisponibilité de 5 % pour la maintenance,
- un taux d'indisponibilité de 3 % pour la fiabilité,

son taux de disponibilité sera de 92 %.

6.7 Exploitation des données en clientèle

6.7.1 Objectif

Il est nécessaire de connaître le comportement des produits et les informations recueillies : ils permettront d'accumuler une expérience utile pour les produits à venir.

● **L'organisation des remontées d'information**

L'exploitation des résultats en clientèle exige une organisation et des précautions rigoureuses. Nous proposons deux approches qui peuvent être complémentaires.

● **Le parc fermé**

On prend en charge un certain nombre de produits bien identifiés, qui feront l'objet, à chaque panne, d'une expertise. Cela peut se faire de différentes manières :

- suivi de quelques produits chez des clients avec qui l'on établit une relation de partenariat ;
- travail en coopération avec une société de dépannage.

Dans le deuxième cas, la difficulté est d'estimer le parc de produits concernés par les défauts constatés. Pour chaque panne, il faut noter :

- l'élément responsable de la panne (distinction entre les défauts consécutifs à la panne et son origine) ;
- la date de la panne ;
- la durée de vie du produit au moment de la panne ;
- les conditions de la panne ;
- la réparation effectuée ;
- éventuellement, l'analyse technologique du mécanisme de défaillance.

L'exploitation des résultats permet de connaître :

- les taux de défaillances des composants en fonction des conditions d'utilisation ;
- les défauts de conception ;
- la fiabilité du produit et de ses sous-ensembles ;
- les mécanismes de défaillance (éventuellement).

● **Le parc ouvert**

Il s'agit de recueillir toutes les informations disponibles sur la totalité des produits en clientèle. C'est une méthode d'estimation très globale qui permet d'avoir une vision d'ensemble des problèmes de fiabilité en clientèle. Mais les informations obtenues sont, en général, peu fiables et d'un intérêt assez limité sur le plan technique. Le souci principal d'un dépanneur est de remettre en état un produit défectueux, et non pas de faire une analyse de la panne ; sa motivation à enregistrer les informations est faible. Néanmoins, il ne faut pas négliger une telle méthode, à condition de ne pas l'utiliser comme un outil d'analyse technique approfondie. C'est un excellent système d'alerte qui permet d'entreprendre des analyses précises sur des points particuliers.

6.7.2 Traitement des données sans suivi individuel des produits

L'objectif que nous nous proposons est de déterminer le taux de défaillances (λ) à partir des données obtenues en après-vente pendant la période de garantie, dans un cas très général où l'on ne dispose pas d'un suivi individuel des produits.

Nous prenons le cas de données recueillies pendant la période de garantie. Nous pouvons généraliser mais, le plus souvent, les données ne sont plus disponibles ou moins facilement exploitables après cette période.

● **Taux de défaillances**

Rappelons la définition du taux de défaillances expérimental :

– $\lambda(t) = k/n \times \Delta T$ défaillances par heure,

avec :

– k : nombre de défaillances,
– pendant une durée ΔT,
– pour un nombre de produits n.

Il s'agit en pratique du taux moyen sur la période ΔT considérée.

Notre analyse portera sur des périodes de temps successives ΔT d'un mois chacune.

Nous admettons que les seules informations dont on dispose sont :

– le nombre de produits vendus dans le mois ;
– le nombre de pannes réparées dans le mois ;
– la date de fabrication des produits en réparation (date indiquée sur le produit).

Examinons le jeu de données suivant (*Tableau 6.5 page suivante*). Ce tableau présente des résultats sur 12 mois de vente de produits garantis sur une période de 5 mois. Ce chiffre est évidemment très faible et irréaliste, mais ce choix nous permet de simplifier notre présentation.

Le tableau indique :

– Les ventes par mois sur 12 mois (colonnes de gauche de la partie supérieure du tableau) : par exemple, le 7e mois ont été vendus 620 produits.

– La part que représentent les ventes d'un mois dans la composition du parc (partie centrale de la partie supérieure du tableau) : on prend en compte pour le mois de mise en vente uniquement la moitié des produits vendus. Par exemple, pour le 7e mois de vente, on considère dans le parc que la moitié des 620 produits vendus, soit 310 produits car les ventes sont en général réparties sur tout le mois et que, par conséquent, la moitié seulement des produits, en moyenne, a été opérationnelle. Le 8e mois, ils seront présents en totalité, soit 620, et enfin, le 11e, ils ne seront que 310 en moyenne, car sortis progressivement du parc tout le long du mois.

– Les réparations par mois. Les produits se distinguent en fonction de leur ancienneté (partie basse du tableau). Par exemple, le 10e mois, on aura réparé 13 produits ayant 2 mois de fonctionnement et 2 produits ayant fonctionné 5 mois. L'idéal serait de disposer de la date de mise en fonctionnement. Mais à défaut on se contentera de la date de fabrication, ce qui donne des ordres de grandeurs suffisants, quitte à ajouter un délai moyen entre la date de fabrication et la date de mise en fonctionnement.

– Les produits vendus forment à un instant donné un « parc » hétérogène puisqu'ils ont été vendus à des dates différentes. Les pannes constatées portent donc sur des produits n'ayant pas la même ancienneté. Maintenant, avec les simplifications que nous venons d'indiquer, nous allons pouvoir déterminer le taux de défaillances mois par mois sur un parc homogène.

Prenons l'exemple du taux de défaillances au 3e mois. Avec les données du tableau, nous avons un cumul de 91 réparations par rapport à 4 770. Ce dernier chiffre s'obtient en cumulant tous les produits ayant fonctionné depuis 3 mois (ils sont sur une diagonale de la partie supérieure du tableau) :

$\lambda = 91/4\ 770 = 0{,}019$ déf./mois

La Figure 6.15 montre l'estimation du taux de défaillances λ sur 5 mois, correspondant à la période sous contrôle.

Tableau 6.5 Données recueillies sur les produits vendus

Mois	Vente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total répar.	Total appar.	Proportion par mois
1	400	200	400	400	400	200										
2	450		225	450	450	450	225									
3	350			175	350	350	350	175								
4	350				175	350	350	350	175							
5	350					175	350	350	350	175						
6	480						240	480	480	480	240					
7	620							310	620	620	620	310				
8	750								375	750	750	750	375			
9	600									300	600	600	600			
10	420										210	420	420			
11	500											250	500			
12	700												350			
Parc du mois		200	625	1025	1375	1525	1515	1665	2000	2325	2420	2330	2245			
Répar. du mois		12	28	39	39	52	50	52	57	71	58	51	50	559		
Mois 1		12	14	15	14	12	18	13	16	21	16	15	18	184	2985	**0,062**
Mois 2			14	18	17	23	15	17	20	17	13	15	16	185	5270	**0,035**
Mois 3				6	5	7	5	10	14	18	12	7	7	91	4770	**0,019**
Mois 4					3	7	9	8	5	10	15	9	7	73	4350	**0,017**
Mois 5						3	3	4	2	5	2	5	2	26	1875	**0,014**

Si l'on souhaite l'exprimer en défaillances par heure, il faut connaître le temps moyen d'utilisation par mois. Supposons qu'il s'agisse de téléviseurs, on sait que le temps moyen d'utilisation par mois est de l'ordre de 150 heures, soit :

λ = 0,019/150 déf./heure = 13.10^{-5} déf./heure

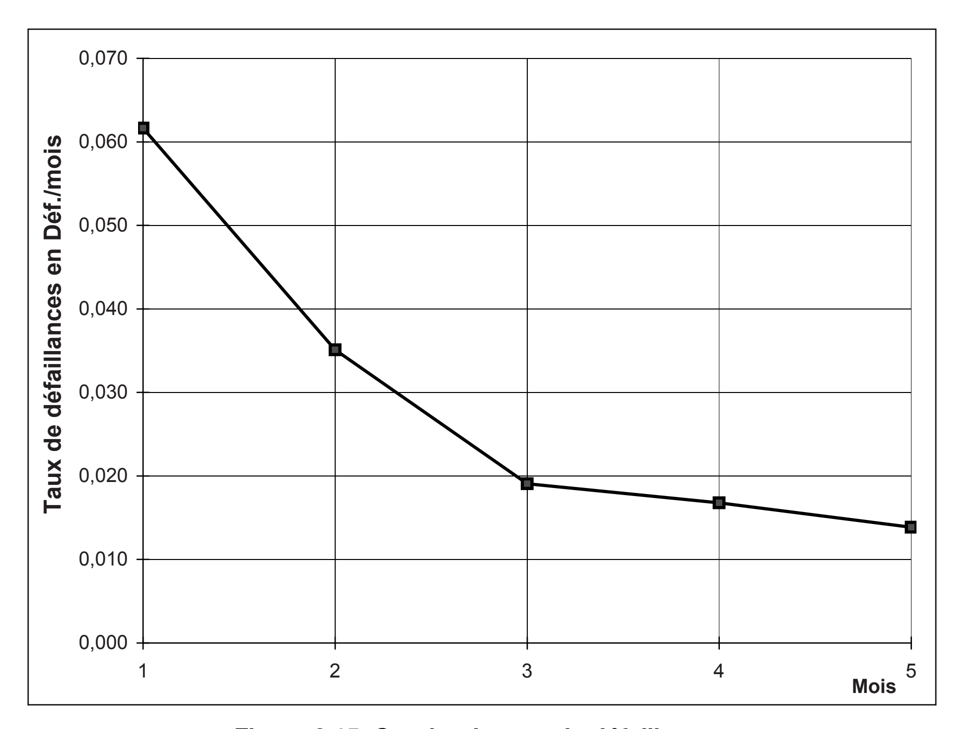


Figure 6.15 Courbe du taux de défaillances

- **Analyse du résultat**

– **La conception.** Le taux de défaillances tend vers un niveau de λ = 0,01 déf./mois. La valeur ne peut être appréciée qu'en référence à ce qui a été spécifié initialement. Ce résultat est la conséquence directe des choix de conception du produit et doit être répercuté aux concepteurs. Cette information sera utile pour le prochain développement.

– **La fabrication.** Le taux de défaillances baisse de 0,062 à 0,01 déf./mois sur les 5 premiers mois. Cette décroissance assez forte signifie que le produit est affecté de défaillances de jeunesse, lesquelles sont attribuables en général à une mauvaise maîtrise de la part de la production. Cette information doit donc être répercutée au fabricant en vue d'un plan d'amélioration.

– **L'après vente.** La période de jeunesse est souvent celle de la période de garantie donc d'un enjeu important pour l'entreprise sur le plan économique.

6.7.3 Pareto des défaillances des produits en après-vente

● Objectifs de l'évaluation

Nous nous proposons d'évaluer la nature des pannes en clientèle et leur importance. Ceci devrait permettre d'améliorer les produits en cours de conception.

● Méthode de relevé des informations

Le relevé des informations relatives aux pannes en clientèle doit être très structuré si l'on veut être en mesure de les exploiter.

La norme NF X 60502 traite des méthodes de relevé des informations à l'utilisation des produits.

Nous allons prendre l'exemple d'un vidéo projecteur vendu en grande série. En cas de panne, on ne peut pas se contenter d'informations telles que « l'image était floue et il a fallu changer la molette de réglage ». Il faut que l'information se prête à un classement.

Nous proposons une solution de relevé en deux parties :

– le **constat client** sous forme d'un nom et d'un substantif : Image/Floue ;
– la **réparation effectuée** ayant permis de résoudre le problème sous forme d'un nom et d'un substantif : Molette/Cassée à l'exclusion de toute réparation n'ayant pas permis de résoudre le problème.

Les noms et les substantifs doivent être prédéfinis.

Le Tableau 6.6 donne un exemple de relevés sur une période d'un an.

Il est facile, sous cette forme, d'associer des proportions que l'on peut pondérer avec le coût des réparations.

Il s'agit bien ici de déterminer la répartition des défaillances et non pas l'importance du nombre de défaillances.

● Exploitation des données

Sous cette forme, le tableau peut faire l'objet de différentes analyses. Le graphique de Pareto étant un moyen intéressant de présenter les résultats (*Figure 6.16*).

Un tel graphique sans pondération des coûts de réparation ne donnerait pas le même classement en termes d'importance.

Tableau 6.6 Relevé d'information sur les pannes

Constat client		Diagnostic		Répartition (proportions)	Coût unitaire réparation en euros	Pondération coût
Image	Absente	Interrupteur	inopérant	8 %	100	7,8 %
Image	Absente	Panne	électrique	7 %	100	6,8 %
Image	Absente	Lampe	grillée	13 %	100	12,6 %
Image	Absente	Lampe	défectueuse	5 %	100	4,9 %
Image	Flou	Molette	cassée	8 %	150	11,7 %
Image	Flou	Molette	usée	3 %	150	4,4 %
Image	Flou	Réglage	difficile	3 %	150	4,4 %
Bruit	Excessif	Ventilateur	bruyant	10 %	200	19,4 %
Bruit	excessif	Ailettes	déformées	5 %	200	9,7 %
Miroir	cassé			13 %	50	6,3 %
Miroir	tombé	Vis	desserrée	23 %	50	11,2 %
Miroir	tombé	rondelle	usée	2 %	50	1,0 %
				100 %		**100 %**

6.8 Coût du cycle de vie ou coût global

6.8.1 Principe

Cette méthode consiste à calculer, dès la conception, l'ensemble des coûts que le client devra supporter durant toute la vie du produit, et ceci afin d'en optimiser le total que l'on appelle le « coût global » ou le « coût de possession ».

Nous donnerons plus loin un exemple.

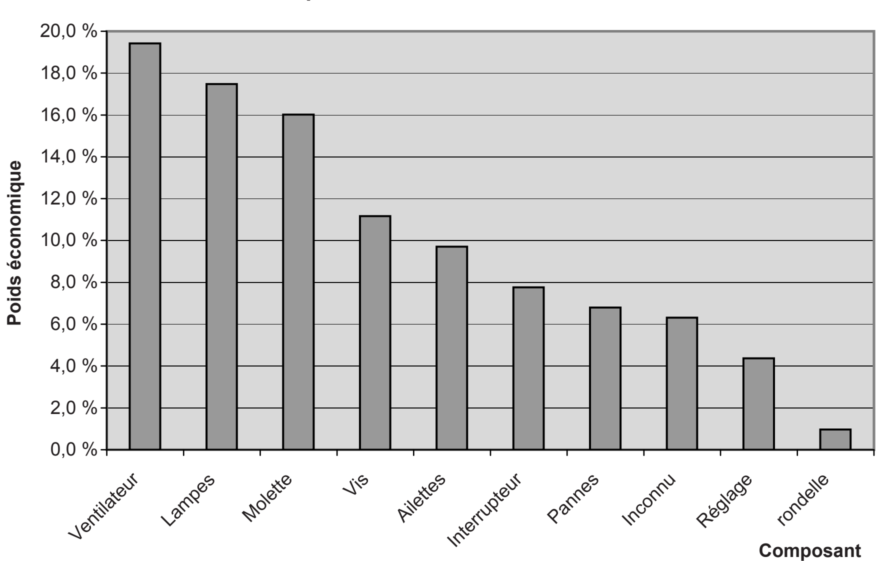


Figure 6.16 Pareto des composants responsables des pannes

6.8.2 Nature des coûts

● **La décomposition des coûts**

Ces coûts se décomposent en quatre grandes catégories. On distingue :

– le coût d'acquisition ;
– le coût d'exploitation ou d'utilisation ;
– le coût de la fin de vie ;
– les coûts en relation avec l'environnement.

● **Le coût d'acquisition**

Il comprend le **prix de vente du fournisseur** constitué de frais :

– industriels : achats, conception, industrialisation, production, installation (éventuellement), etc. ;
– commerciaux ;
– de distribution ;
– généraux, taxes et impôts ;

– de service après-vente (SAV) ;

auxquels il faut ajouter la marge.

L'**acheteur** doit ajouter au prix d'achat **les frais qui lui sont propres**, tels les frais financiers, notamment en cas de recours à un prêt

S'il s'agit d'une entreprise, il faut ajouter les frais :

– d'assurances (par exemple en cas d'achat à l'étranger) ;
– de transport (éventuellement) ;
– de stockage ;
– financiers liés au stockage ;
– etc.

● **Le coût d'utilisation**

Il comprend tous les frais liés à l'utilisation du produit. Cela concerne :

– la consommation d'énergie (carburant, électricité, etc.) ;
– la maintenance (réparations, entretien, modifications, etc.) ;
– les assurances ;
– les taxes ;
– etc.

● **Les coûts en relation avec la fin de vie**

Ils comprennent les frais liés à :

– la destruction ;
– les recyclages et récupérations.

Pour ces derniers, les coûts peuvent apporter un gain.

● **Les coûts écologiques**

Ils comprennent les répercussions éventuelles sur le plan écologique du fait de la fabrication, de l'utilisation ou de la destruction du produit, avec cette caractéristique que ces frais sont supportés, sauf taxes spécifiques, par la société.

6.8.3 Objectif

L'ensemble de ces coûts forme le « **coût global** » ou « **coût du cycle de vie** ».

On appelle l'ensemble des coûts supportés par le client le « **coût de possession** ».

Ceci est résumé dans le Tableau 6.7 suivant.

Tableau 6.7 Décomposition des coûts du produit

<table>
<tr><td>coût d'acquisition</td><td rowspan="3">Coût de possession[6]</td><td rowspan="4">Coût du cycle de vie
Ou
Coût global[7]</td></tr>
<tr><td>coût d'exploitation</td></tr>
<tr><td>coût de fin de vie</td></tr>
<tr><td>coûts environnementaux</td><td></td></tr>
</table>

L'objectif est d'optimiser le coût du cycle de vie ou au moins le coût de possession.

Par exemple, une amélioration de la fiabilité ou une réduction des consommations peuvent entraîner une augmentation du prix de revient donc du coût d'acquisition, mais compensé par un gain sur le coût d'exploitation (*Voir graphique de la Figure 6.17*).

Ou encore, une technologie plus chère peut entraîner une augmentation du prix de revient donc du coût d'acquisition compensée par un gain sur les coûts écologiques.

Ces exemples montrent la grande difficulté d'optimiser alors que les intérêts des uns et des autres ne convergent pas nécessairement.

Le client souhaite un coût d'achat le plus faible possible mais, par méconnaissance, subira un coût d'exploitation élevé. Ceux-ci peuvent atteindre plusieurs fois le prix d'acquisition, l'enjeu est donc d'importance.

Il est difficile d'accepter un produit plus cher pour réduire les coûts écologiques. Et dans la pratique, seul un système de taxes permettra une optimisation sur ce plan.

6. Dans le domaine de l'achat en entreprise, il est traditionnel d'appeler coût de possession le coût d'acquisition au sens large, intégrant les frais de transport (éventuellement), de stockage, frais financiers liés au stockage et aux pertes de produits (inutilisés, périmés, détériorés…). Donc nous donnons ici une définition beaucoup plus large du coût de possession.
7. Le coût global est défini dans la norme AFNOR N F 50-150 comme « la somme des dépenses sur l'ensemble de la vie d'un produit pour un usage donnée ».

Cependant la solution se trouvera dans :

– une bonne relation client-fournisseur au cours de laquelle tous les éléments économiques seront mis sur la table de façon à faire des choix où fournisseurs et clients mettront leurs intérêts en commun. Le coût global peut alors devenir un élément contractuel ;

– une action d'information des associations de consommateurs (exemple de l'automobile) qui donneront les éléments de coûts susceptibles de montrer aux clients que leur intérêt n'est pas nécessairement d'acheter un produit peu cher.

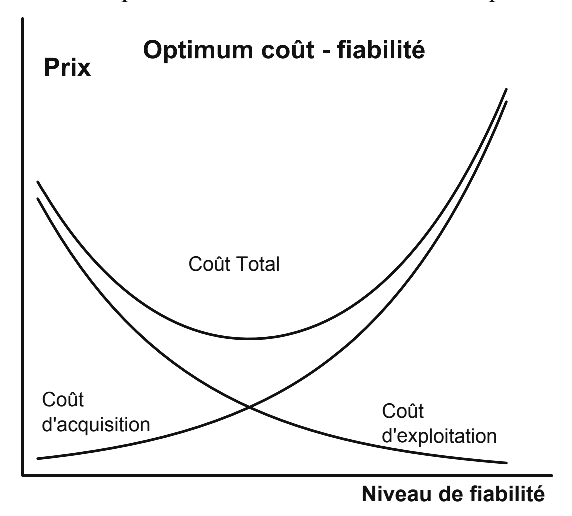


Figure 6.17 Optimum coût fiabilité

6.8.4 Cas d'application de la méthode de calcul du coût du cycle de vie

La méthode sera utile principalement dans les situations suivantes :

– la comparaison de différentes conceptions alternatives d'un produit en cours de développement ;

– une relation contractuelle entre un client fournisseur avec une recherche d'optimum économique ;

– une comparaison du coût global par un acheteur entre plusieurs produits concurrents ;

– la détermination de la période où un produit gagne à être remplacé, les frais risquant de devenir prohibitifs.

6.8.5 Calcul du coût du cycle de vie

● Les données

Cette méthode exige de rassembler beaucoup d'éléments :

- données industrielles (main-d'œuvre, taux, matières, frais, etc.) ;
- données en clientèle : taux de défaillance, durée de vie, coût de réparation, entretien, consommation, etc.

Ces données étant prévisionnelles, cela suppose souvent de faire des modélisations à partir de données recueillies précédemment ou d'établir des modèles théoriques.

Ce coût est calculé au cours de la conception du produit, et doit faire évoluer celle-ci en apportant les corrections nécessaires.

● Les conditions

La méthode implique de bien décrire les conditions d'utilisations.

Prenons l'exemple d'une chaudière.

Il faut connaître :

- le temps de fonctionnement du produit : permanent ou discontinu, fréquence d'arrêts/allumages…
- comment le produit fonctionne : combien de marche arrêt de certains composants : pompe, accélérateur, combien de manipulation de certains dispositifs…

Prenons l'exemple d'un vidéo projecteur.

Il faut connaître :

- la durée de fonctionnement par jour, par an ; le nombre de manipulations par jours, les conditions externes de température, humidité… en cours de fonctionnement et de stockage…
- comment fonctionne le produit : combien de réglage par jour du dispositif optique, combien de marches/arrêts par jour…

6.8.6 Présentation de la méthode à partir d'un exemple

● Données

Reprenons l'exemple de l'achat d'une chaudière au fioul.

Les données sont les suivantes[8] :

– Coût d'acquisition :
  - Prix de revient : 1 100 euros
  - Provision pour SAV : 100 euros
  - Marge : 300 euros
  - Prix de vente : 1 500 euros
– Durée de vie prévue : 8 ans
– Conditions de fonctionnement :
  - Fonctionnement 24 h/24 h sur 6 mois par an soit 4 380 heures/an
  - Consommation de fioul : 4 000 litres/an
  - Le rendement thermique est estimé à 80 %. Mais le vieillissement naturel du matériel conduira selon les études à une dégradation de ce rendement au bout de quatre ans d'utilisation pour descendre à 70 %.
– Le prix du fioul est de : 0,85 euros/l
– Frais d'entretien : 150 euros/an
– La consommation électrique est de : 50 watts/h à 0,08 euros/kWh
– Le « taux de défaillances » prévisionnel est estimé à :
  - 1re année : 0,00020 défaut/heure
  - 2e année : 0,00015 défaut/heure
  - 3e à 6e année : 0,00010 défaut/heure
  - 7e année : 0,00100 défaut/heure
  - 8e et dernière année : 0,00150 défaut/heure
– Le prix d'une réparation est de : 200 euros/réparation
– Période de garantie : 1 an

● **Calculs**

Tous les calculs sont récapitulés dans le Tableau 6.10 p. 230.

– Perte sur rendement et cas de prise en compte d'un taux d'inflation

8. Toutes ces données sont purement fictives et n'ont qu'un objectif : montrer l'intérêt du calcul du coût du cycle de vie.

Nous avons adopté le principe de ne considérer que **les pertes liées au rendement** de la chaudière. Calculer le coût de consommation ne nous paraît pas pertinent car le fonctionnement normal est de brûler du fioul.

Coût annuel les 4 premières années : 4 000 litres × (1 – 0,80 %) × 0,85 euro/litre = 680 euros.

La baisse de rendement à 70 % à partir de la cinquième se traduira par une surconsommation entraînant un coût annuel de : 4 000 litres × (1 – 0,70 %) × 0,85 euro/litre = 1 020 euros.

Mais pour ce poste, et exclusivement celui-ci, nous avons pris en compte un taux d'inflation de 5 % avec la formule traditionnelle $(1 + 0{,}05)^{n}$, *n* étant le n° de l'année car nous avons estimé que le fioul risquait de voir son prix augmenter et ceci d'une façon sensible.

– Consommation électrique : Coût : 4 380 heures × 50 watts × 0,08 euro/w = 17,52 euros/an
– Coût entretien : Coût : 150 euros/an
– Prix des réparations

C'est le point le plus délicat mais pourtant d'une grande importance. Il suppose que le fabriquant soit en mesure d'estimer le « taux de défaillances » du produit. Traditionnellement, ce taux[9] est décroissant au départ, puis se stabilise avant de remonter en fin de vie. Les taux proposés correspondent à ce schéma.

Le calcul donne à titre d'exemple :

– pour la 1re année :
  - probabilité de pannes : 0,00020 × 4 380 heures = 0,876 euro
  - coût correspondant : 0,876 × 200 euros/réparation = 175,20 euros
– pour la 2e année :
  - probabilité de pannes : 0,00015 × 4 380 heures = 0,657
  - coût correspondant : 0,657 × 200 euros/réparation = 131,40 euros
– etc.

9. Rappelons la définition « taux de défaillances expérimental » : $\lambda(t) = k/n\ \Delta T$ défaillances par heure avec *k* : nombre de défaillances pendant une durée ΔT pour un nombre de produits *n*. Il s'agit en pratique du taux moyen sur la période ΔT considérée. Ici $n = 1$ puisque l'on fait les calculs pour un produit.

On notera que le coût de 175,20 euros pour la première année ne figure pas dans le tableau au titre des frais de réparation car il est à la charge du fournisseur au titre de la garantie.

- Récupération en fin de vie
- Coût récupéré : 200 euros.
- Taux d'actualisation

  Les calculs ont été faits jusqu'ici en euros constants, sauf une inflation pour le fioul.

  Mais il est d'usage de multiplier les coûts annuels par un taux dit « taux d'actualisation ». La définition n'en est pas si simple. Disons, pour simplifier, que le taux d'actualisation (à ne pas confondre avec le taux d'inflation) prend en compte le fait que la valeur d'un bien dans le futur ne peut pas avoir la même valeur que celle que l'on estime aujourd'hui.[10]

  Si a est le taux d'actualisation, les coûts seront multipliés par : $1/(1 + a)^n$, n étant le n° de l'année. Nous avons choisi un taux assez traditionnel de 5 %.

● Analyse des résultats

Coût du cycle de vie

Examinons le tableau de synthèse suivant (*voir Tableau 6.8*) illustré également par un graphique de Pareto (*voir Figure 6.18*).

Nous obtenons un coût global de 13 587 euros dont le détail met bien en évidence l'importance du coût d'exploitation de 12 287 euros qui est très supérieur au prix d'acquisition.

On voit que l'actualisation donne un chiffre plus faible.

Ce coût, qui est prévisionnel, est très utile pour :

- une négociation entre le client et le fournisseur pour rechercher les possibilités de réduction notamment s'il s'agit d'un contrat portant sur un grand nombre de produits ;
- une comparaison sur plusieurs offres de fournisseurs différents.

---

10. Selon Wikipédia : « L'actualisation est la méthode qui sert à ramener sur une même base des flux financiers non directement comparables qui se produisent à des dates différentes. Cela permet non seulement de les comparer mais également d'effectuer sur eux des opérations arithmétiques. »

Tableau 6.8 Coûts du cycle de vie

Coût du cycle de vie	Total
Origine des coûts	**Coût en euros**
Coût d'acquisition (prix d'achat)	**1 500**
Perte sur rendement	**8 275**
Prix des réparations	**2 672**
Coût entretien	**1 200**
Consommation électrique	**140**
Récupération	**-200**
Coût du cycle de vie	**13 587**
Coût du cycle de vie actualisé	**10 804**
Coût d'exploitation	**12 287**

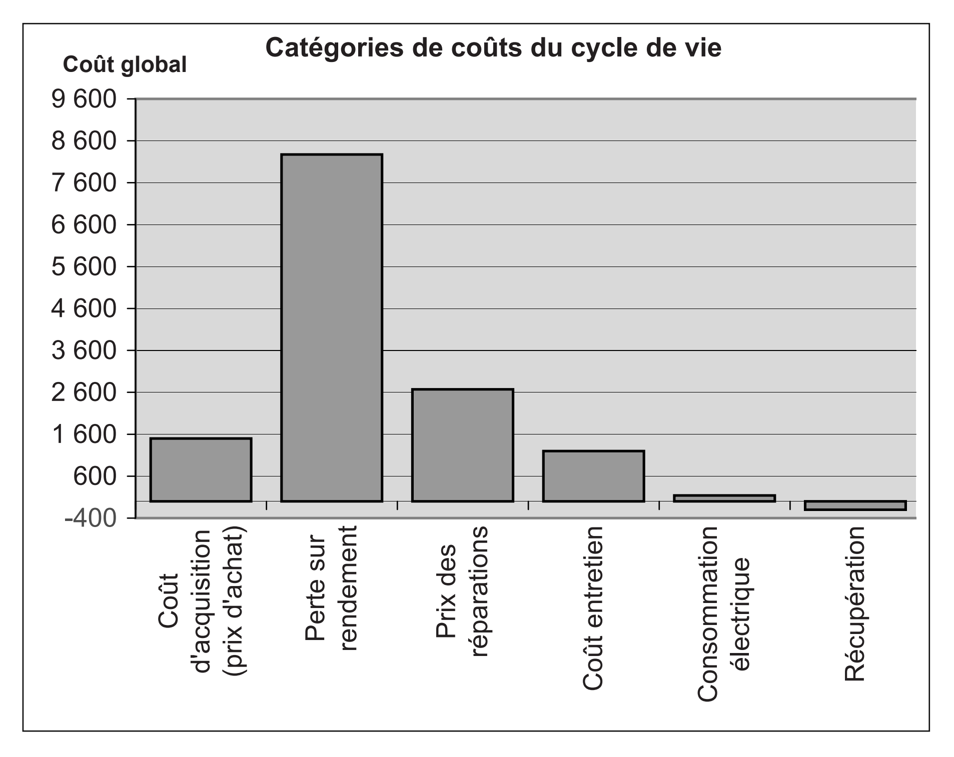


Figure 6.18 Coût du cycle de vie de la chaudière

Coût du cycle de vie : outils de recherche d'amélioration

Il est souvent possible de faire des simulations permettant de faire évoluer le produit dans un sens favorable.

Supposons que l'on puisse réduire d'un coefficient 2 les « taux de défaillances » tels qu'évalués initialement (ce qui n'est pas particulièrement ambitieux), et ceci pour un surcoût de 100 euros. Les calculs que nous ne présentons pas ici (*voir Tableau 6.9*), mais qui ne sont que l'application des formules déjà présentées, montrent que le « coût du cycle de vie » passerait de 13 587 à 12 416 euros, soit un gain de 1 171 euros grâce à la réduction des coûts de réparation, ce qui augmente également le taux de disponibilité du produit. On voit à quel point la recherche systématique du prix d'achat le plus faible peut être néfaste.

Tableau 6.9 Coût du cycle de vie avec amélioration du produit

Coût du cycle de vie	**Total**
Origine des coûts	**Coût en euros**
Coût d'acquisition (prix d'achat)	**1 600**
Perte sur rendement	**8 275**
Prix des réparations	**1 402**
Coût entretien	**1 200**
Consommation électrique	**140**
Récupération	**-200**
Coût du cycle de vie	**12 416**
Coût du cycle de vie actualisé	**10 003**
Coût d'exploitation	**11 016**

Recherche de la durée de remplacement

Nous avions admis que la chaudière était prévue pour 8 années avant remplacement.

Une simulation, en envisageant un remplacement après une période plus ou moins longue, donne les résultats illustrés par le graphique suivant *(Figure 6.19*). Le paramètre pris en compte est un coût moyen annuel, sachant que notre décision sera prise sur la base du coût moyen annuel le plus faible. On voit *(Figure 6.20*) que sans taux d'actualisation, nous opterions pour environ 4,5 années et 5 avec taux d'actualisation.

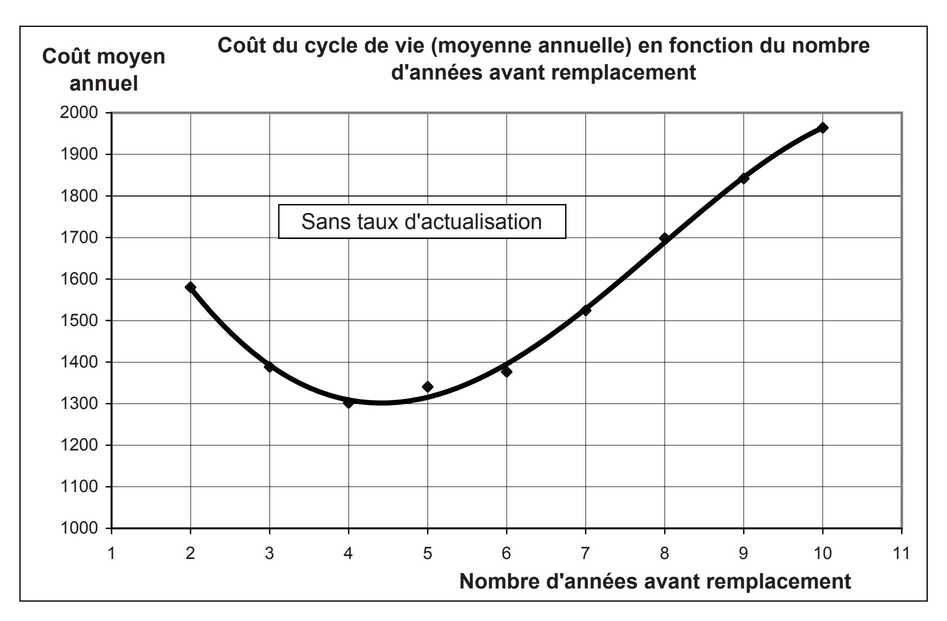


Figure 6.19 Moyenne annuelle du coût du cycle de vie sans taux d'actualisation

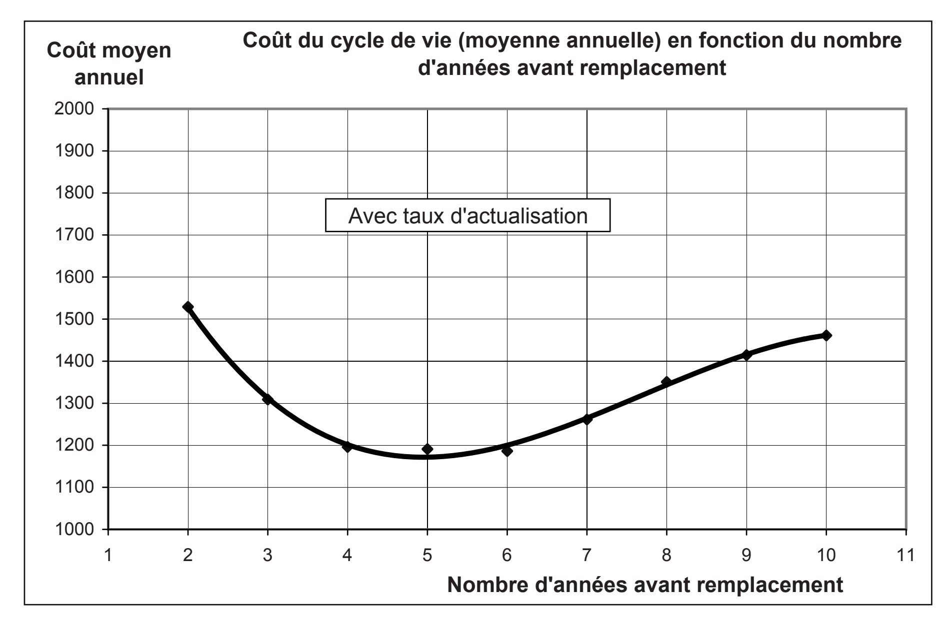


Figure 6.20 Moyenne annuelle du coût du cycle de vie avec taux d'actualisation

Point de vue du fabriquant

Le tableau de calcul n'indique aucun coût de réparation pour la première année puisque ces coûts sont supportés par le fournisseur au titre de la garantie.

Ce coût est de 175,20 euros.

Or ce fournisseur a, selon nos données, provisionné 100 euros pour les frais de garantie. Cela signifie que sa marge de 300 euros sera amputée de 75,20 euros dont il n'a pas vraiment conscience d'autant plus que dans la pratique cette perte est reportée dans le temps.

Si nous faisons à nouveau une hypothèse d'une réduction d'un coefficient 2 les taux de défaillances pour un surcoût de 100 euros (supporté par ailleurs par le client) les frais de garantie passeraient à 87,60 euros, d'où un profit qui passerait de 224,80 à 312,40.

6.8.7 Conclusions

Nous voyons (*Tableau 6.10 page suivante*) à quel point le prix d'achat d'un produit est un élément qui peut être marginal par rapport aux frais à supporter au cours de la vie du produit. Force est de constater que, bien souvent, le prix d'achat est le seul pris en compte, que cela soit par les particuliers et par les entreprises.

6.9 Sûreté de fonctionnement : son management

6.9.1 Management de la sûreté de fonctionnement

Le management de la fiabilité est synthétisé dans le schéma de la Figure 6.21. Nous orientons l'analyse dans le contexte d'un produit de série par exemple un vidéo projecteur, en nous plaçant dans le cas classique d'un nouveau modèle d'un produit existant. Par exemple l'entreprise conçoit et produit traditionnellement des vidéo projecteurs et se propose de lancer un nouveau modèle.

Nous distinguons quatre grandes phases :

– une phase de préparation qui aboutit à la rédaction des **spécifications de la fiabilité** ;
– la **conception** proprement dite ;
– la **production** ;
– l'**après vente**.

Tableau 6.10 Tableau de calculs

Année		1	2	3	4	5	6	7	8	8
Prix de revient	1 100									
Provision pour SAV	100									
Marge	300									
Surcoût éventuel (amélioration fiabilité)	0									
Coût d'acquisition (prix d'achat)	1 500									
Exploitation										
Perte sur rendement	8 275	680	714	750	787	1 240	1 302	1 367	1 435	
Consommation électrique	140	18	18	18	18	18	18	18	18	
Coût entretien	1 200	150	150	150	150	150	150	150	150	
Prix des réparations	2 672		131	88	88	88	88	876	1 314	
Récupération	-200									-200
Coût d'exploitation	12 287	848	1 013	1 005	1 042	1 495	1 557	2 410	2 917	
Coût du cycle de vie	13 587	2 348	1 013	1 005	1 042	1 495	1 557	2 410	2 917	-200
Taux d'actualisation 5 %		0,95	0,91	0,86	0,82	0,78	0,75	0,71	0,68	2,08
Coût du cycle de vie actualisé	10 804	2 236	919	868	858	1 171	1 162	1 713	1 974	-96
Coût du cycle de vie moyenne annuelle	1 698									

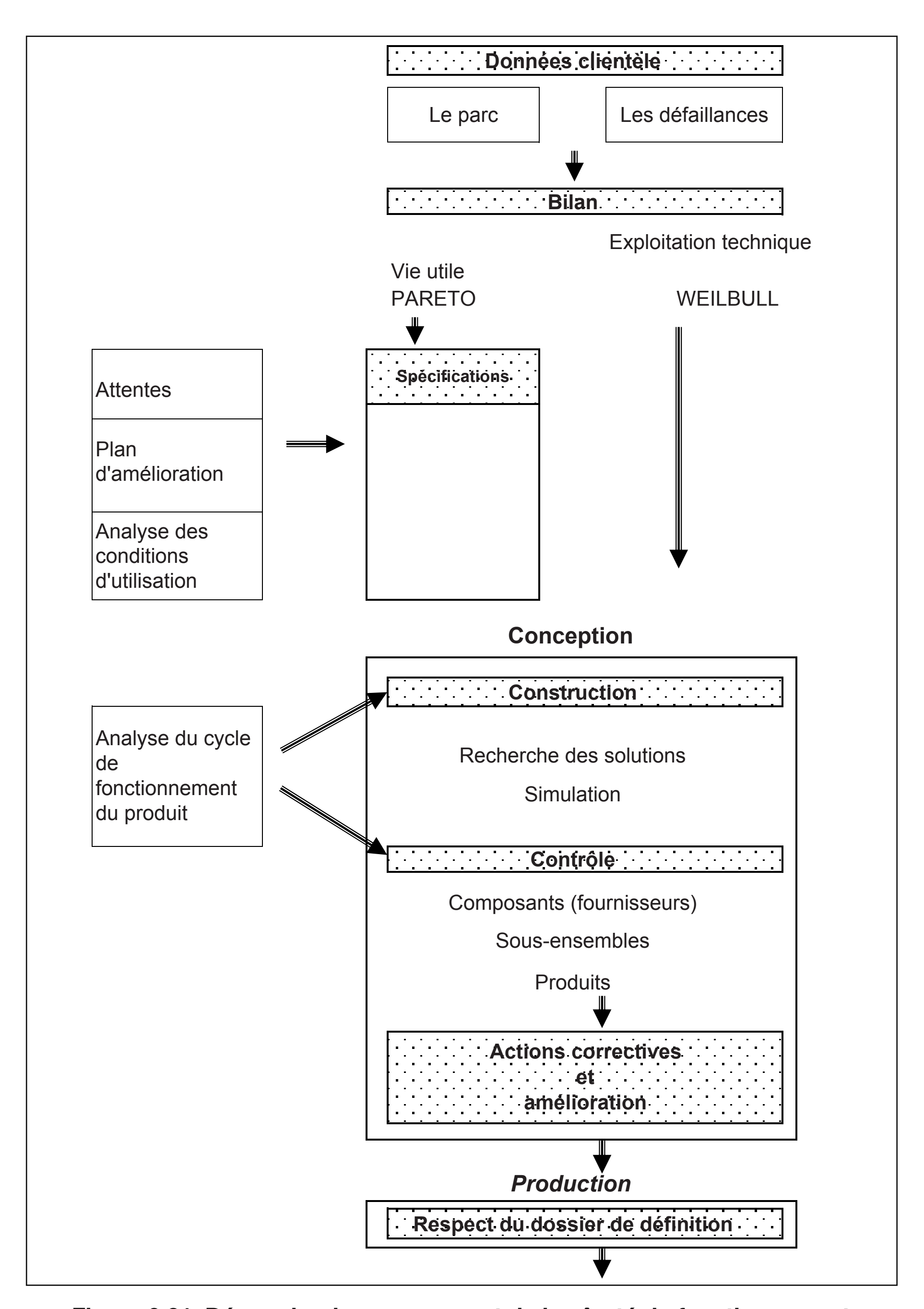


Figure 6.21 Démarche de management de la sûreté de fonctionnement

Bien que ces quatre phases forment un tout et qu'elles soient toutes importantes, nous insistons sur l'impact de la conception. La fiabilité dépend presque exclusivement du choix des composants et de leurs fournisseurs, et du choix des principes de conception opérés pendant cette phase. Le rôle de la production étant de réaliser le produit conformément au dossier de définition, une production mal faite peut rendre peu fiable un produit bien conçu mais ne pourra jamais rendre fiable un produit mal conçu.

6.9.2 Sûreté de fonctionnement et spécification du produit

● **Spécification de la fiabilité**

La « spécification de la fiabilité » du produit est la donnée d'entrée principale de la conception. Elle mérite donc un soin tout particulier. Elle est l'aboutissement :

– **de l'étude des attentes clients**, notamment par rapport à la concurrence. Bien sûr, le client dira qu'il veut un produit sans défaillances et la difficulté est de percevoir à partir de quel taux de défaillances il marquera une nette insatisfaction ;

– **des objectifs généraux** que l'entreprise a pu se fixer en termes d'amélioration de la fiabilité. Cela peut être par exemple la réduction des réclamations ou une plus grande résistance à l'usure de l'ensemble de la gamme de produits, ou encore une politique d'expansion vers un marché professionnel plus exigeant ;

– **de l'analyse des conditions d'utilisation**. Par exemple, pour un vidéo projecteur, une telle étude peut mettre en évidence des déplacements fréquents des appareils entraînant des chocs, des allumages-extinctions fréquents, un usage dans des conditions de bureau peu contraignantes, des ajustements fréquents de la qualité de l'image. Autant d'éléments qui doivent être pris en compte dans la conception pour éviter par exemple des usures prématurées de certaines pièces ;

– **de l'analyse des résultats en clientèle** sur les modèles précédents. Cela peut être :

  - l'analyse des « taux de défaillances » l'analyse de la « durée de vie utile »,

  - la mise en évidence des défauts les plus fréquents ou des points faibles par des graphiques de Pareto.

● **Rédaction des spécifications de la fiabilité**

Nous traitons ce point dans le paragraphe 13.6.3 sur la définition du produit.

6.9.3 Traitement de la fiabilité en conception

Lors de la conception le management de la fiabilité suppose une démarche rigoureuse.

Nous proposons la démarche suivante :

– 1. Identifier les paramètres de fiabilité du produit et leurs spécifications.

– 2. Déterminer les éléments contribuant aux résultats (composants et technologies).

– 3. Utiliser les techniques d'analyse suivantes (si adaptées) :

  - Faire les calculs théoriques de fiabilité (simulation) à partir des banques de données disponibles. Il existe par exemple dans le domaine de l'électronique des tables donnant les taux de défaillances des différentes familles de composants en fonction des contraintes appliquées. Les calculs prennent en compte une loi de la fiabilité fondamentale qui est que lorsqu'un produit comprend plusieurs composants et que leur probabilité de défaillance sont indépendante le taux de défaillances du produit est la somme du taux de défaillances de chacun des composants : $\lambda_{total} = \sum_i \lambda_i$

    Les taux de défaillances sont présumés constants, s'ils ne le sont pas la formule reste valable en considérant les taux moyens sur une période donnée. Citons les tables :

    MIL-HDBK 217 (US Army)

    RDF 2000, UTE C80-810 ou Norme CEI 62380 édition 1

  - Appliquer L'AMDEC produit : cette méthode est très efficace pour prévenir les risques de défaillances. Elle consiste à rechercher systématiquement tous les risques de défaillances et leurs causes et de chercher des solutions limitant les risques de manifestation de ces causes potentielles.

  - Pour des produits complexes ou des systèmes on construira un « arbre de défaillances » : son principe consiste à analyser pour chaque fonction les événements ou combinaison d'événements susceptible de nuire à la fonction. L'analyse s'appuie sur la construction d'un arbre mettant en évidence les relations logiques entre ces événements ce qui permet de calculer la probabilité de défaillances de la fonction considérée à partir des probabilités associées à ces événements élémentaires.

– 4. Lancer un programme d'essais sur les points les plus sensibles et les moins connus sur les composants, sous-ensembles ou produit finis. La plupart du temps, il faudra faire des essais accélérés.
– 5. En fonction des résultats, faire les corrections nécessaires telles que : redimensionner les composants, réduire les contraintes, faire des redondances.
– 6. Spécifier les composants en fonction de leurs contributions aux caractéristiques du produit. Les spécifications doivent être rédigées et négociées avec les fournisseurs.
– 7. S'assurer que les composants choisis ont le niveau de fiabilité souhaité.

6.9.4 Quelques principes à respecter en conception

La fiabilité s'obtient en respectant quelques principes :

1. Utiliser un nombre minimum de composants. Les techniques d'analyse de la valeur ou d'analyse de la conception permettent de réduire parfois de plus de 60 % le nombre initialement prévu de composants.
2. Utiliser des composants dont le taux de défaillances λ et la durée de vie sont connus. (intégrer les paramètres de fiabilité dans les spécifications de ces composants).
3. Minimiser les contraintes en se plaçant assez loin des limites autorisées.
4. Éviter les surcharges marginales en prévoyant des dispositifs de protection (par exemple : un condensateur pour tuer les surtensions courtes et importantes dans un circuit électrique, un limiteur de vitesse sur un moteur, etc.).

6.9.5 Traitement de la fiabilité en production

Comme nous l'avons déjà dit la fiabilité dépend presque exclusivement du choix des composants et de leurs fournisseurs, et des principes de conception retenus.

Le rôle essentiel de la production est donc de respecter rigoureusement le « dossier de définition » et le « dossier de production » tel qu'établis lors du processus de conception/industrialisation. La contribution à la fiabilité de la production est donc la rigueur dans sa façon de travailler en rappelant qu'un produit mal conçu avec une fiabilité insuffisante ne peut pas être rendu fiable par la façon de produire.

● Déverminage

Nous revenons sur ce point déjà évoqué dans le chapitre sur le processus de production. Parfois on utilise des techniques de « déverminage » consistant à faire subir aux produits des contraintes suffisamment légères pour ne pas les détériorer mais suffisamment fortes pour révéler des défauts latents qui seraient apparus en début de vie en utilisation.

> Par exemple une soudure mal faite sur un circuit électronique peut assurer sa fonction mais après une période de fonctionnement elle peut se révéler défectueuse.

Un déverminage fera apparaître le défaut avant livraison du produit. Ces techniques sont très chères et d'usage nécessairement limité.

● Fiabilisation

Pour des produits qui ont des niveaux de fiabilité spécifiés très sévères, le « dossier de production » imposera des vérifications extrêmement rigoureuses à tous les stades de production. Par exemple, chaque soudure sera vérifiée, chaque lot de composants vérifié sur le plan de la fiabilité à partir d'un échantillon, etc. On appelle parfois ceci la « fiabilisation » du produit, ce qui n'exprime pas parfaitement la nature de l'action qui est plutôt orientée sur les contrôles. Lorsque ce type de vérification est impossible physiquement, on imposera de la part de l'opérateur une certification de compétence basée sur des critères très stricts.

6.9.6 Après-vente

● Assistance auprès de la clientèle

Pour des appareils ou des systèmes, il peut être nécessaire d'assurer auprès des clients une assistance permettant de maintenir les produits en bon état de fonctionnement.

On distingue alors le « soutien logistique intégré » et le « maintien en conditions opérationnelles ».

● Soutien logistique intégré

Il s'agit de tout ce qui doit être étudié et préparé pendant la conception afin de maintenir les produits en bon état de fonctionnement.

Citons :

– la documentation technique utilisateur ;

- la formation des utilisateurs, documents, outils et méthodes de formation ;
- la politique de maintenance préventive/corrective, réparation ou changement ;
- la détermination des pièces d'usure ;
- la détermination des stocks de pièces de rechange (gestion, localisation…) ;
- la détermination des prestataires de maintenance ;
- la définition des appareils de maintenance et de contrôle (outillage, logiciels...) ;
- les rapports et enregistrements au cours de la vie du produit.

Ce dernier point est particulièrement important pour la conception des futurs produits. Les informations relevées sont de nature technique (nature et dates des pannes, leurs causes, les circonstances, etc.) et économiques (coût des réparations, immobilisations, etc.).

On constate aisément que tout ce travail doit s'appuyer sur des prévisions. C'est-à-dire qu'il est indispensable d'avoir estimé les taux de défaillances prévisionnels des produits, sous-ensembles et composants ainsi que les mécanismes d'usure et des composants concernés.

● **Maintien en conditions opérationnelles**

Il s'agit de tout ce qui doit être réalisé pendant la vie des produits afin de les maintenir en bon état de fonctionnement. C'est la partie opérationnelle correspondant au soutien logistique intégré.

Citons :

- l'assistance technique ;
- la réparation ;
- la maintenance ;
- la gestion des pièces de rechange ;
- le traitement des informations :
  - suivi de fiabilité, calcul des indicateurs (λ, MTBF, vie utile…),
  - gestion de configuration.

Ce dernier point est traité sur des produits professionnels. Il s'agit de suivre toutes les modifications ou évolutions faites sur chacun des produits vendus.

Par exemple, chaque exemplaire d'un appareil électronique monté sur des avions sera parfaitement identifié avec l'historique complet de sa vie et notamment son état à un instant donné permettant une traçabilité très fine.

Quelques normes de base de la sûreté de fonctionnement

- NF X 60-500 Terminologie relative à la Fiabilité - Maintenabilité - Disponibilité
- NF X 60-502 (décembre 1986) : Fiabilité en exploitation et après-vente
- NF X 60-503 (novembre 1985) : Introduction à la disponibilité
- NF X 60-510 (CEI 812-1985) (Décembre 1986) : Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes – Procédures d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)
- NF X 60-520 (CEI 863-1986) (Mai 1988) : Prévisions des caractéristiques de fiabilité, maintenabilité et disponibilité
- NF C 20-7xx (CEI 68-2) : Essais fondamentaux climatiques et de robustesse mécanique - méthodes d'essais
- NF EN 61114 : *Croissance de la fiabilité – Tests et Méthodes d'estimation statistiques*
- CEI 60068-2 : *Série de normes sur les Essais fondamentaux climatiques et de robustesse mécanique - méthodes d'essais*
- NF EN 61164 : *Croissance de la fiabilité – Tests et Méthodes d'estimation statistiques*

7

Le contrôle des produits dans l'industrie

7.1 Définitions et principes

7.1.1 Définition du contrôle

Nous allons nous intéresser au contrôle dans une perspective de productions industrielles.

Ce mot « contrôle » est tellement utilisé que chacun lui donne un sens un peu différent. Il paraît donc utile de commencer par rappeler ses définitions officielles :

> **Selon la norme NF X 50-120 :**
>
> Contrôle – Actions de mesurer, examiner, essayer, passer au crible une ou plusieurs caractéristiques d'un produit ou service et de les comparer aux exigences spécifiées en vue d'établir leur conformité.
>
> **Selon l'ISO 9000 (2008) :**
>
> Évaluation de la conformité par observation et jugement accompagné si nécessaire de mesures, d'essais ou de calibrage.

Le dictionnaire donne comme synonyme des mots tels qu'inspection, vérification, surveillance, expertise.

Le contrôle peut porter sur la qualité d'un produit ou d'un lot de produits, sur les paramètres d'un processus de fabrication ou, plus généralement, de réalisation, sur la qualité d'un travail, sur le fonctionnement d'un système qualité, etc. Sur ce dernier point, on peut considérer que l'audit est le contrôle du système de management de la qualité. Nous n'aborderons que le contrôle des produits.

Les définitions précédentes font apparaître certains termes que nous examinerons tels que :

– « mesurer », ce qui introduit des dispositifs de mesure ou d'observation qui doivent donner accès aux caractéristiques avec un minimum d'incertitude ;
– « une ou plusieurs caractéristiques », ce qui amène au problème du choix des caractéristiques à mesurer, sur combien de produits, et à quel moment, etc. ;
– « Évaluation », « expertise », termes qui élargissent la notion de base de vérification de la conformité.

Mais elles nous laissent sur notre faim quant à la véritable utilité du contrôle.

7.1.2 Utilité du contrôle

● Contrôle et décision

Dans une démarche qualité, le contrôle prend tout son sens si on lui associe une décision ou une action : décider de refuser un produit ou un lot de produits, de corriger ou d'améliorer les produits ou le processus de production, évaluer le niveau de qualité, informer sur ce niveau, etc. Son utilité ne peut être évaluée qu'en fonction de ces décisions et actions.

● Perception du contrôle

Cependant, l'utilité du contrôle est parfois contestée et l'on peut s'en étonner. Le contrôle a pris bien souvent un caractère péjoratif, tout à fait à tort à notre avis, au point de remplacer son nom par d'autres expressions considérées comme équivalentes (« surveillance » ou « audit »). Le contrôle est parfois mal perçu, notamment quand il peut mettre en cause le travail des personnes. Certains le considèrent comme un mal que l'on devrait pouvoir éviter.

● Contrôle et prévention

On a voulu opposer contrôle à prévention : si l'on a bien fait le travail, pourquoi contrôler ?

Il est normal de se poser la question de l'utilité d'un contrôle lorsque les démarches qualité de l'entreprise sont fortement imprégnées de prévention, que le personnel est parfaitement qualifié, que tout a été organisé pour faire de bons produits du premier coup, etc. Pourtant, le contrôle reste nécessaire : « la confiance n'exclut pas le contrôle », comme on dit souvent.

● Contrôle et évaluation de la qualité

On a également voulu l'opposer à l'évaluation. Or, ce sont des notions complémentaires, le contrôle étant souvent à la base de l'évaluation. On voit avec un certain étonnement la nouvelle définition du contrôle donnée par la norme ISO 9000:2008 qui commence par le mot « évaluation ».

● Contrôle : un acte positif

Le contrôle doit être perçu comme un acte positif et nécessaire. Le contrôle (*to check* en anglais) fait partie du cycle d'action et d'amélioration PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) qui est la base du fonctionnement des démarches qualité. Nous avons besoin de contrôler nos actions pour savoir où nous nous situons. Contrôler des produits, c'est s'assurer que nous avons atteint nos objectifs et, en fonction du résultat, corriger et améliorer. Travailler sans contrôle, c'est travailler en aveugle. Il est clair que, même si l'on a pris toutes les précautions, il reste nécessaire de s'assurer que le bon résultat est atteint.

Les domaines tels que le spatial, le nucléaire, l'aviation ont obtenu des résultats remarquables en appliquant, entre autres, des procédures de contrôle extrêmement rigoureuses.

● Optimisation du contrôle

Le contrôle doit être adapté aux circonstances. Par exemple, le contrôle doit être allégé si :

– le processus de fabrication est bien stabilisé et bien maîtrisé ;

– la prévention est développée dans les démarches qualité.

Le véritable problème du contrôle n'est pas de savoir s'il faut en faire ou non, mais d'optimiser sa réalisation. Il s'agit d'un problème de gestion des risques.

Un contrôle ne devient inutile que lorsque l'on a acquis la certitude que le risque de non-conformité est quasiment nul. Mais le risque zéro n'existe pas.

L'optimisation des opérations de contrôle s'obtient :

- en adoptant les méthodes (système d'échantillonnage par exemple) et les moyens (appareils de mesure par exemple) qui offrent le meilleur rapport efficacité/coût ;
- en choisissant le moment le plus judicieux pour le positionner ; par exemple, il peut être « antiéconomique » en production de faire un contrôle en fin de production, là où le produit est le plus cher, alors que le défaut est apparu en début de production ;
- en adaptant l'importance du contrôle aux risques encourus ; par exemple, une caractéristique critique doit faire l'objet d'un contrôle plus important qu'un défaut d'aspect mineur. Mais le coût de ce contrôle peut nous contraindre à en limiter l'importance. De même, il peut être préférable de contrôler les paramètres du processus plutôt que le produit qui en résulte.

● **Contrôle dans les démarches qualité**

Pour conclure, si le contrôle est nécessaire, il ne doit pas nous conduire à négliger de mettre la priorité sur les actions de prévention.

7.2 Trois phases du contrôle

Pour être conformes aux principes présentés, un contrôle doit avoir trois phases :

- vérifier la conformité ;
- informer ;
- décider et préparer les actions de correction.

7.2.1 Vérifier la conformité (vérification et validation)

Dans une pratique industrielle, il y a deux façons de savoir si l'on a atteint ses objectifs :

- les contrôles qui se réfèrent à la spécification du produit ;
- la vérification des résultats obtenus chez le client (interne ou externe) qu'il faut confronter à ses besoins ou attentes : c'est ce que l'on appelle la validation.

Les deux sont en fait indispensables : le contrôle permet de s'assurer de la conformité à la spécification, l'examen des résultats en clientèle est une autre forme du contrôle qui intègre la qualité de la spécification.

Nous devons également distinguer :

– la « non-conformité », qui correspond au non-respect d'une exigence de la spécification du produit ;
– le produit « non conforme », dont une ou plusieurs exigences de la spécification ne sont pas respectées.

7.2.2 Informer

Le processus d'action corrective ou d'amélioration implique la mise en place d'un système d'information sur les résultats de contrôle.

L'information doit aller au-delà d'une simple donnée sur la non-conformité et le besoin d'action corrective. Le contrôle doit être une source d'information :

– sur le niveau de qualité (taux de non-conformité, tendance) ;
– sur les causes des non-conformités.

Si la recherche de ces éléments ne fait pas partie intégrante du contrôle, elle en est un prolongement essentiel. On verra par la suite que la richesse d'un contrôle tient parfois beaucoup plus aux informations qu'il permet de fournir et aux améliorations qui en résultent qu'à son aptitude à éliminer les produits ou lots défectueux.

7.2.3 Décider et corriger

En cas de détection d'une non-conformité, le contrôle doit aboutir à une décision. Cela peut être : refuser des produits ou un lot de produits, notamment dans une relation client-fournisseur, modifier ou corriger les produits. Même si cela ne fait pas partie du contrôle proprement dit, celui-ci doit être le point de départ d'une action corrective du ou des processus de réalisation.

7.3 Différents types de contrôle d'un point de vue statistique

7.3.1 Contrôles unitaires (ou à 100 % des produits)

Par définition, c'est un contrôle qui porte sur la totalité des produits. Mais, d'une façon quasi générale, il ne peut porter que sur un nombre limité de caractéristiques du produit. Il n'y aurait aucun sens à l'exercer sur la plupart des caractéristiques du produit.

Par exemple, tout contrôle destructif ou susceptible d'endommager le produit (on pense notamment à toutes les caractéristiques de fiabilité) ne peut bien évidemment pas être effectué à 100 %. L'aptitude d'un téléviseur à résister aux chocs, conformément à sa spécification, ne peut naturellement pas être vérifiée à 100 %. De même, s'il s'agit de produits en vrac tels qu'une poudre, un contrôle à 100 % n'a aucun sens.

7.3.2 Contrôles par échantillonnage (ou par prélèvement)

Ce type de contrôle consiste à s'assurer de la conformité d'un lot de produits à sa spécification à partir d'un échantillon de quelques produits. Le contrôle peut alors porter sur un lot, une série de lots ou sur les produits fabriqués dans un laps de temps (c'est ce qui se pratique dans les démarches de maîtrise statistique des procédés [MSP]). Il permet de vérifier une proportion de non-conformités, une valeur moyenne, une caractéristique de dispersion, un taux de défaillances, etc. À l'inverse du contrôle à 100 %, il peut porter sur toutes les caractéristiques du produit. Seules des considérations économiques peuvent en limiter l'utilisation.

7.4 Caractéristiques des différents types de contrôle de produits

7.4.1 Adaptation du contrôle aux objectifs

Le contrôle peut prendre des formes différentes et mettre l'accent sur certains aspects tels que le processus de décision et le traitement de l'information. En fait, il doit être adapté aux objectifs que l'on se fixe :

- sélectionner des produits ou des lots de produits ;
- décider de l'acceptation d'un lot de produits dans une relation client-fournisseur ;
- évaluer le niveau de qualité des fournisseurs ;
- suivre le niveau de qualité, à titre de surveillance, des produits fabriqués par l'entreprise au stade final ou à des stades intermédiaires ;
- s'assurer que la conception du produit est conforme aux exigences.

Ces points seront examinés ultérieurement au cas par cas. Un des critères de choix important est la « sélectivité » du contrôle.

7.4.2 Sélectivité du contrôle

Nous appelons ainsi l'aptitude d'un contrôle à distinguer les produits conformes des non conformes et, par conséquent, à éliminer ces derniers.

Soit *p* % la proportion de produits non conformes dans un lot soumis à un contrôle. Après contrôle, on peut espérer que cette proportion soit réduite. Nous notons « *p* % avant » cette proportion avant le contrôle, « *p* % après » la proportion après le contrôle, comme représenté dans le schéma suivant *(Figure 7.1)*.

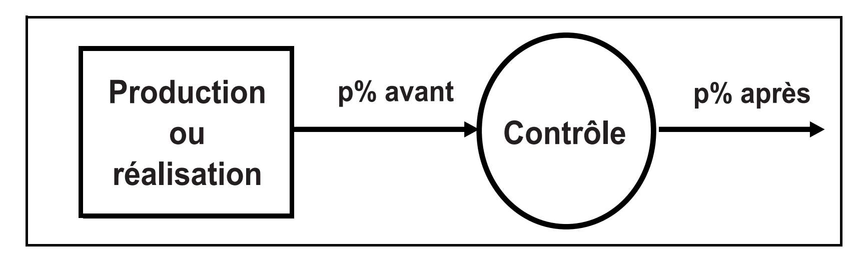


Figure 7.1 Sélectivité du contrôle

Nous mesurons la « sélectivité »1 par :

$$S = \frac{p\%avant - p\%après}{p\%avant}$$

Il nous faut analyser cette notion de qualité soumise au contrôle évaluée par « *p* % avant » dans le cas assez général d'une production de série. Pour cela, nous prenons l'exemple d'une série de 10 lots soumis à un contrôle et nous supposons connaître la proportion réelle de non conformes de chacun des lots. Par simplification, supposons que les 10 lots soient de taille identique : N = 1 000 produits. Le tableau 7.1 donne un exemple de chiffres.

Tableau 7.1 Proportion réelle de non conformes

N° de lot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P % avant	1	3,1	2,5	0,5	1,5	5,0	2,0	5,0	2,5	0,5

1. Le lecteur averti doit bien distinguer cette notion de « sélectivité » telle que nous la définissons dans ce document, de la notion de « courbe d'efficacité » associée à un contrôle par échantillonnage, même si elles ne sont pas indépendantes.

Ce tableau met en évidence le fait que la qualité issue de la production donne des résultats qui ne sont pas constants, les proportions allant de 0,5 à 5 % (pour simplifier, nous avons pris en exemple des valeurs importantes, sachant qu'en général les exigences qualité imposent des valeurs très faibles).

Cette hétérogénéité correspond à une situation quasi générale. La valeur moyenne, dite « qualité moyenne de la fabrication » (« process average » en anglais), est une caractéristique essentielle d'un processus de fabrication. C'est ce à quoi le client est sensible car le mécontentement est proportionnel à cette qualité moyenne, et les coûts associés aux non conformes sont proportionnels à cette valeur moyenne (étant supposé que la spécification corresponde bien aux besoins du client). Cette valeur moyenne fait souvent l'objet, dans un contrat, d'un niveau limite. Ce niveau atteint de plus en plus des valeurs très basses, au point de ne plus les exprimer en %, mais en ppm (partie par million). Bien sûr, le client escompte l'absence complète de défaut (zéro défaut). Il nous semble plus souhaitable et plus réaliste de fixer dans le contrat un niveau d'acceptation de défaut, même très faible, que d'imposer une exigence de zéro défaut.

En revanche, la dispersion des résultats d'un lot à l'autre a une signification complémentaire. Elle indique le manque de maîtrise du processus. Dans notre exemple, la proportion de non conformes va de 0,5 % à 5 %, ce qui dénote une assez forte dispersion. Plus la dispersion des résultats est grande, moins le processus est maîtrisé.

Ces bases étant posées, la sélectivité dépend des points suivants.

● Performance du dispositif de mesure ou d'observation

S'agissant d'une caractéristique mesurable (une dimension par exemple), elle s'évalue à partir de caractéristiques telles que l'incertitude de mesure.

Cette performance peut être généralisée aux caractéristiques par attributs qui relèvent d'observations (la présence de taches, par exemple).

Nous présenterons ultérieurement la façon de mesurer de telles performances.

● Type de non-conformités

Un contrôle est souvent impuissant devant :

- les « défauts intermittents » (par exemple, un mauvais contact en électronique) ;
- les « défauts cachés » (par exemple, une fissure à l'intérieur d'un matériau) ;

– les « défaillances de jeunesse », qui se révèlent en début de vie du produit mais sont bien présentes au moment de la livraison (par exemple, une soudure mal faite qui ne se révélera qu'après quelques chocs tels que le produit en supporte pendant son transport).

● **Type de contrôle unitaire (100 %) ou par échantillonnage**

Évidemment, la sélectivité dépendra pour une large part du choix d'un contrôle unitaire ou par échantillonnage. Nous allons examiner plus particulièrement ce point.

7.4.3 Mesure de la sélectivité d'un contrôle à 100 %

Reprenons notre exemple de 10 lots de taille identique (N = 1 000) soumis à un contrôle à 100 % des produits. Le tableau ci-après (*Tableau 7.2*) propose les résultats suivants.

Tableau 7.2 Sélectivité d'un contrôle à 100 %

N° de lot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P % avant	1	3,1	2,5	0,5	1,5	5,0	2,0	5,0	2,5	0,5
P % après	0,2	0,5	0,3	0,1	0,2	1,0	0,2	1,1	0,5	0,1

Ce tableau met en évidence que la sélectivité n'est pas constante d'un lot à l'autre (80 % sur le premier lot, 84 % sur le deuxième, etc.), ce qui est tout à fait habituel. Là encore, il nous faut raisonner sur des valeurs moyennes.

– Le taux de non conformes moyen sur les 10 lots soumis au contrôle est de 2,36 %.

– Le taux de non conformes moyen sur les 10 lots après contrôle est de 0,42 % :

Soit : $S = \dfrac{2{,}36\ \% - 0{,}42\ \%}{2{,}36\ \%} = 82\ \%$

Bien sûr, de tels résultats ont un caractère purement théorique car, dans la pratique, ces pourcentages de défauts sont inconnus et même, en général, impossibles à connaître avec certitude. Ils ne peuvent faire l'objet que d'estimations.

7.4.4 Mesure de la sélectivité d'un contrôle par échantillonnage

Le principe d'un contrôle par échantillonnage consiste pour un contrôle simple à :

– prélever n produits dans un lot de N produits ;

– fixer pour le nombre de non conformes *k* dans le prélèvement un critère d'acceptation *Ca* :
  - si $k \leq Ca$, le lot est accepté,
  - si $k > Ca$, le lot est refusé.

Nous verrons ultérieurement les principes de détermination d'un plan de contrôle par échantillonnage. Pour l'instant, nous ne nous préoccupons pas des décisions suite à un refus (réparation, correction, contrôle 100 %, destruction…), nous nous contentons d'écarter les lots refusés.

Nous remarquerons que la sélectivité est très médiocre, voire nulle. Ce point est particulièrement paradoxal. Par exemple, l'entreprise qui fait un contrôle réception par prélèvement escompte parfois une action de sélectivité. Or c'est une illusion !

Ceci peut être mis en évidence par la simulation suivante, s'appuyant sur l'exemple que nous avions pris pour le contrôle à 100 %.

Prenons comme exemple un contrôle par échantillonnage de $n = 80$ avec un *Ca* (critère d'acceptation) de 1.

Le hasard lié à l'échantillonnage nous a donné les résultats suivants (*Tableau 7.3*).

Tableau 7.3 Sélectivité d'un contrôle par échantillonnage avec mise à l'écart des lots refusés

N° de lot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P % avant	1	3,1	2,5	0,5	1,5	5,0	2,0	5,0	2,5	0,5
Décision après contrôle	A	A	A	A	R	R	A	R	A	A
P % après	1	3,1	2,5	0,5			2,0		2,5	0,5

A : Accepté R : Refusé

– Le taux moyen de non conformes sur les 10 lots soumis au contrôle est de 2,36 %.
– Le taux moyen de non conformes sur les 10 lots après contrôle est de 1,73 %.

La sélectivité est : $S = \dfrac{2{,}36\ \% - 1{,}73\ \%}{2{,}36\ \%} = 27\ \%$

C'est tout à fait médiocre. Et pourtant, nous allons voir que nous nous sommes mis dans des conditions favorables.

Notre exemple montre que les lots les plus mauvais sont refusés et les meilleurs acceptés, mais ce n'est qu'une tendance. Les aléas du prélèvement font qu'un mauvais lot peut être accepté, et un lot assez bon refusé. Par exemple, le lot 5 est refusé, bien que meilleur que le lot 3 qui est accepté.

Si nous refaisions la même simulation sur différents niveaux moyens de qualité (moyenne de *p* % avant) nous obtiendrions la courbe suivante (*Figure 7.2*), où nous avons reporté notre résultat de 27 % de sélectivité pour la qualité moyenne de fabrication de 2,36 %.

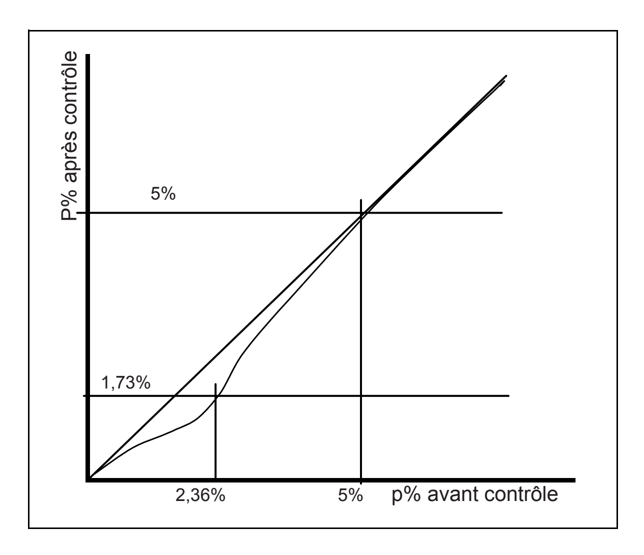


Figure 7.2 Exemple de sélectivité d'un contrôle par échantillonnage, avec mise à l'écart des lots refusés, en fonction de la qualité moyenne

Cette courbe montre une situation qui peut paraître paradoxale :

– la sélectivité se dégrade pour tendre vers 0 lorsque la qualité s'améliore, ce qui n'est pas préoccupant : la qualité est bonne avant le contrôle et le reste après ;

– mais la sélectivité se dégrade également pour tendre vers 0 lorsque la qualité devient plus mauvaise ! (la sélectivité est de 0 % lorsque « *p* % après » = « *p* % avant », c'est-à-dire lorsque l'on se trouve sur la diagonale). Autrement dit, la qualité est mauvaise avant le contrôle et pratiquement aussi mauvaise après le contrôle.

Cette courbe révèle une grande médiocrité d'ensemble de la sélectivité d'un contrôle par échantillonnage.

Un autre paradoxe est que, plus la qualité est homogène, plus cette sélectivité est mauvaise. À la limite, imaginons que les 10 lots soumis au contrôle aient chacun exactement la même proportion de non conformes, par exemple 1 % ; après soumission au contrôle par échantillonnage, les lots acceptés auront exactement la même proportion de non conformes, à savoir 1 %, ce qui donne une sélectivité constamment nulle.

Si ces constatations peuvent inquiéter, il faut dire qu'en contrepartie, plus le taux de non conformes est élevé, plus la proportion de lots refusés sera grande. Ceci signifie que la pression sur la fabrication deviendra très forte et que la nécessité des actions correctives deviendra impérieuse *(Figure 7.3)*.

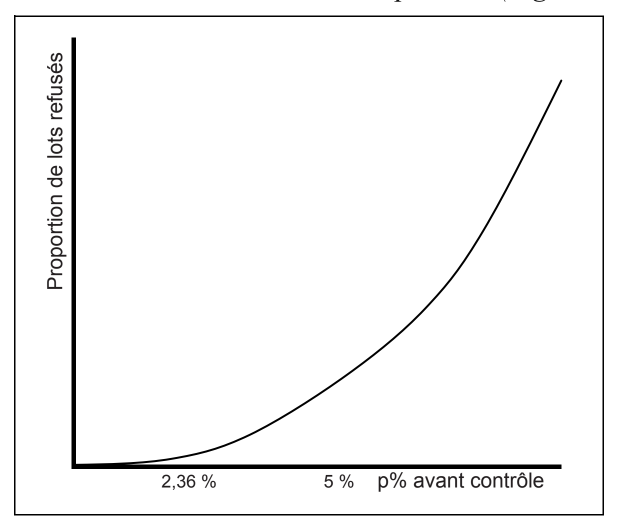


Figure 7.3 Proportion de lots refusés en fonction du niveau de qualité

En résumé, notre exemple nous a permis d'illustrer que :

– le contrôle par échantillonnage permet d'éliminer en priorité les lots les plus mauvais ;
– plus la qualité est mauvaise, plus grand sera le nombre de lots refusés ;
– la sélectivité est globalement d'une grande médiocrité et d'autant plus mauvaise que la qualité est mauvaise ;
– l'effet principal sera la nécessaire réaction de la fabrication de procéder aux actions correctives.

On pourrait objecter que la stratégie qui consiste à éliminer les lots refusés n'est pas la meilleure. En effet, on pourrait adopter une stratégie consistant à contrôler à 100 % tous les lots refusés.

Reprenons notre exemple *(Tableau 7.4)*.

Tableau 7.4 Sélectivité d'un contrôle par échantillonnage avec tri des lots refusés

N° de lot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P % avant	1	3,1	2,5	0,5	1,5	5,0	2,0	5,0	2,5	0,5
Décision après contrôle	A	A	A	A	R	R	A	R	A	A
P % après	1	3,1	2,5	0,5	0	0	2,0	0	2,5	0,5

À chaque fois qu'un lot est refusé, nous le trions et obtenons une qualité de 0 % de non conformes.

Sur notre exemple, le taux moyen de non conformes sur les 10 lots après contrôle à 100 % des lots refusés est passé de 1,73 % à 1,21 %. Le calcul de la sélectivité globale passe de 27 % à 49 %.

Ceci améliore nettement la situation. Comme on peut le constater sur le graphique suivant *(Figure 7.4)*, la qualité après l'ensemble des deux contrôles ne peut pas, en moyenne, dépasser une valeur maximum qui dépend naturellement du plan de contrôle par échantillonnage choisi. Ce maximum s'appelle le LQMAC : Limite de qualité moyenne après contrôle.

Ceci peut apparaître encore comme un paradoxe mais on comprendra que, lorsque le niveau de qualité moyen devient très mauvais, pratiquement tous les lots sont arrêtés au contrôle par échantillonnage puis triés, ce qui va se traduire par une qualité après contrôle parfaite.

Mais ce choix stratégique n'est pas réaliste et présente un intérêt uniquement théorique. En fait, dans la pratique, dès que les résultats sur les premiers lots font apparaître un mauvais niveau de qualité, une action corrective est entreprise afin d'améliorer ce niveau. D'autre part, le tri des lots refusés est une situation qui ne peut être qu'exceptionnelle. Trier les mauvais lots ne peut pas relever d'une bonne démarche qualité. De plus, le résultat théorique n'intègre pas le fait qu'un contrôle unitaire n'a pas une sélectivité parfaite comme on l'a vu. Plus grave, souvent un tri se traduit, du fait des manipulations, par une dégradation de la qualité.

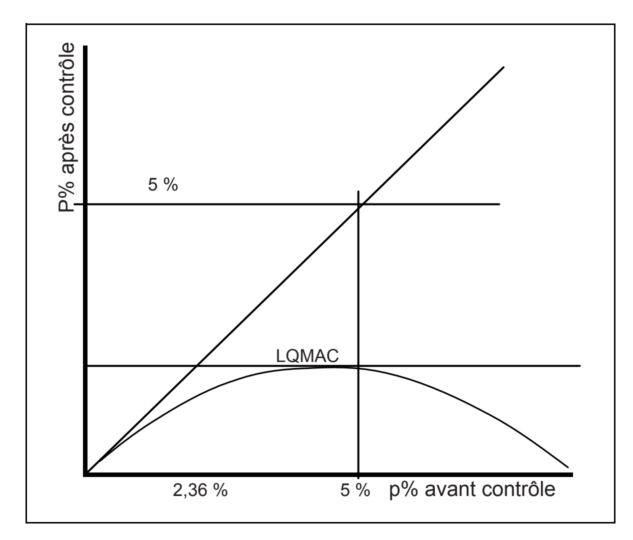


Figure 7.4 Sélectivité d'un contrôle par échantillonnage avec tri des lots refusés en fonction de la qualité moyenne

7.4.5 Bilan des différents types de contrôle

● Critère de choix

Pour répondre aux différentes situations de contrôle, notre choix d'un type de contrôle s'appuiera sur des critères de coût, de sélectivité, de richesse d'informations fournies. Nous allons pouvoir maintenant les comparer sur la base de ces critères.

● Contrôle unitaire

Sa sélectivité est bonne en général, mais ne peut porter que sur un nombre limité de caractéristiques. Son coût est en général élevé, même s'il ne porte que sur un nombre limité de caractéristiques.

Son utilité se limite essentiellement au contexte de production. De ce fait, l'information sur les résultats de contrôle risque d'être peu élaborée car le fabricant n'a pas, en général, la disponibilité suffisante pour mettre en place les systèmes de traitement des informations et, le cas échéant, pour les exploiter. Mais, là encore, l'information est limitée aux quelques caractéristiques contrôlées.

● Contrôle par échantillonnage

Sa sélectivité est très faible. Son coût est réduit car il porte sur peu de produits. Mais il faut nuancer ce propos, car le contrôle de certaines caractéristiques peut être cher, on pense notamment à toutes les caractéristiques liées à la fiabilité.

La grande force d'un contrôle par échantillonnage est la richesse de l'information. Il peut porter sur toutes les caractéristiques du produit et, en général, dans un contexte où l'on peut prendre plus de temps à l'exploitation de cette information.

● Retour d'informations

De cette réflexion ressort notre attachement à la remontée des informations du contrôle pour les actions de correction et d'amélioration. À notre sens, cet aspect doit faire partie intégrante du contrôle, ce que nous mettons en valeur par le graphique suivant *(Figure 7.5)*.

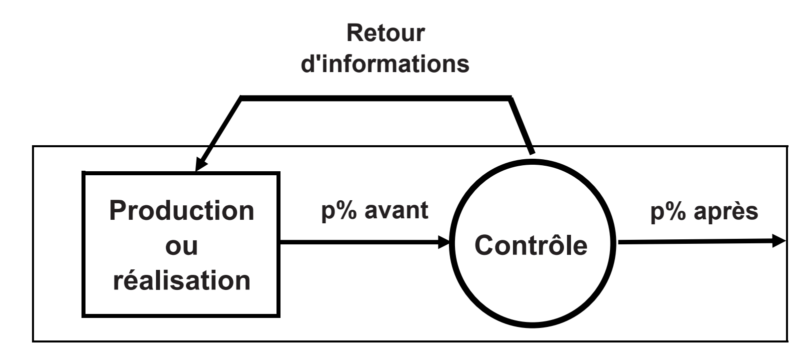


Figure 7.5 Le retour d'informations

7.5 Choix du type de contrôle

Nous avons maintenant les différents éléments permettant de mieux choisir un type de contrôle suivant les objectifs poursuivis. Nous examinerons dans un autre chapitre, au cas par cas, le meilleur choix de contrôle à faire en fonction de ces objectifs, mais nous pouvons déjà donner quelques grandes orientations résumées dans le tableau suivant *(Tableau 7.5)*.

Tableau 7.5 Le contrôle et ses objectifs

Objectifs du contrôle	Type de contrôle	Situation	Caractère prépondérant du contrôle	Actions complémentaires
Sélectionner des produits ou des lots de produits	Unitaire	Production : Interopérationnel et final	Sélection	Actions préventives et correctives
Décider de l'acceptation d'un lot de produits dans une relation client-fournisseur	Échantillonnage	Contrôle de sortie et réception	Information	Négociation de plan d'assurance de la qualité Actions correctives Plans d'amélioration
Suivre un niveau de qualité	Échantillonnage	Contrôle de sortie et réception	Information	Traitement approfondi de l'information Plans d'amélioration
S'assurer que la conception du produit est conforme aux exigences	Échantillonnage ou Unitaire sur prototypes	Vérification et validation en cours de conception	Information	Traitement approfondi de l'information Plans d'amélioration

7.6 Contrôle par échantillonnage

7.6.1 Principes de base

Le contrôle par échantillonnage consiste à s'assurer, sur la base d'un échantillon représentatif de produits, qu'un lot de produits considéré est conforme à un niveau de qualité spécifié. Nous nous intéressons exclusivement à la spécification d'un taux de non conformes ou non-conformités ; d'autres caractéristiques statistiques pourraient être traitées telles qu'une valeur moyenne, un écart type, un taux de défaillances… dans la mesure où elles sont spécifiées.

Pour un échantillonnage simple, comme nous l'avons dit plus haut, la procédure consiste :

– à prélever n produits dans un lot de N produits.
– à fixer pour le nombre k de non conformes (ou de non-conformités) dans le prélèvement un critère d'acceptation Ca :
  - si $k \leq Ca$, le lot est accepté,
  - si $k > Ca$, le lot est refusé.

Mais il existe des procédures d'échantillonnage plus élaborées.

7.6.2 Non conformes et non-conformités

k peut être le nombre de « non-conformités » ou le nombre de produits « non conformes », sachant que chaque produit peut avoir plusieurs caractéristiques non conformes, c'est-à-dire plusieurs non-conformités.

Par souci de simplification, nous nous limiterons au cas où k représente le nombre de produits non conformes. Cela correspond à ce qui est le plus souvent utilisé.

7.6.3 Échantillonnage et lot homogène

● **Prélèvement au hasard**

L'échantillon de n produits dans un lot de N produits doit être représentatif du lot. Pour cela, il faut respecter une règle simple en apparence : chaque produit du lot doit avoir la même probabilité d'être sélectionné lors du prélèvement.

Une solution est de numéroter chaque produit et de faire un tirage d'une série de numéros à partir d'une table de « nombres au hasard ». Ceci peut être obtenu également par la fonction aléa d'un tableur.

Mais cela n'est pas toujours possible physiquement ou peut se révéler très cher. Par exemple, il est difficile d'accéder aux produits au fond d'un contenant de grande taille.

Si un lot de produits comprend plusieurs parties (sous-lots ou strates), le prélèvement peut être effectué par stratification, c'est-à-dire en répartissant les prélèvements proportionnellement à l'effectif de chacun des sous-lots. Ceci présente deux avantages : d'abord cette solution permet souvent de faciliter physiquement la constitution d'un échantillonnage représentatif et, ensuite, en cas de refus, elle peut faciliter l'analyse en permettant parfois d'identifier un sous-lot plus particulièrement défectueux. Mais, d'un strict point de vue statistique, le prélèvement au hasard dans la totalité du lot est la meilleure solution.

● **Lot homogène**

Un lot est homogène quand il a été produit dans des conditions stables, sans qu'aucun facteur du processus de fabrication n'ait varié au risque de créer une hétérogénéité entre les différentes parties du lot.

Par exemple, pour la fabrication de pièces plastiques, il ne faudrait pas avoir, dans un même lot, des pièces fabriquées sur deux machines différentes, avec deux lots de matière différents ou en provenance de deux fournisseurs, etc.

Cette notion est tout à fait relative et écrire dans une spécification que le lot doit être homogène risque d'être un peu vague. Il est souhaitable le plus souvent de préciser les critères d'homogénéité.

Par exemple : lot provenant d'une même machine, fait dans une même journée, avec un même lot de matière première, etc.

Il est traditionnel de dire que, pour que l'échantillon soit représentatif, il faut que le lot soit homogène. Ceci n'a aucune validité statistique. En fait, si le prélèvement est fait au hasard, il n'est nul besoin d'avoir une exigence d'homogénéité. En revanche, l'exigence d'avoir des lots homogènes se justifie surtout pour des questions de traçabilité et d'analyse en cas de problème sur un lot. Enfin, si les lots sont homogènes, on comprendra que la contrainte de prélever au hasard perde de son acuité.

7.6.4 Décision

Le lot refusé peut être :

- retourné au fournisseur interne ou externe à l'entreprise ;
- détruit ;

– corrigé en fonction du type de non-conformité détectée ;

– accepté par dérogation.

Cette décision n'est pas neutre sur l'impact général de la qualité. En effet, en dehors de l'aspect financier, elle stimulera plus ou moins le fabriquant ou le fournisseur concerné à entreprendre un plan d'amélioration.

7.6.5 Courbe d'efficacité

● **Définition**

Pour comprendre les risques d'erreurs inhérents au principe même de décision sur la base d'un échantillon, il faut maîtriser la notion de « courbe d'efficacité » associée à un contrôle.

Examinons une telle courbe pour le cas d'un échantillonnage dans les conditions suivantes prises comme exemple :

– un prélèvement de : $n = 80$ produits

– dans un lot de : $N = 1\ 000$ produits

– critère d'acceptation : $Ca = 0$

La courbe d'efficacité associée à ce plan de contrôle est représentée sur le graphique de la Figure 7.6. Elle donne la probabilité d'acceptation d'un lot qui aurait une proportion de non conformes donnée.

Par exemple :

– un lot qui aurait 2 % de non conformes a une probabilité de 20 % d'être accepté ;

– un lot qui aurait 0,4 % de non conformes a une probabilité de 75 % d'être accepté.

Nous avons également représenté la courbe d'efficacité pour $Ca = 2$. Elle donne bien sûr des probabilités d'acceptation plus grandes pour un même pourcentage de non conformes. Par exemple, un lot qui aurait 2 % de non conformes a une probabilité de 77 % d'être accepté contre 20 % avec $Ca = 0$.

Ces graphiques sont obtenus à partir de la loi de probabilité binomiale. Celle-ci donne, dans un prélèvement de n produits, les probabilités respectives de trouver $k = 0$, ou 1, ou 2… non conformes lorsque la proportion de non conformes du lot a un niveau connu p %. La connaissance de cette loi n'est pas indispensable pour comprendre les principes du contrôle par échantillonnage.

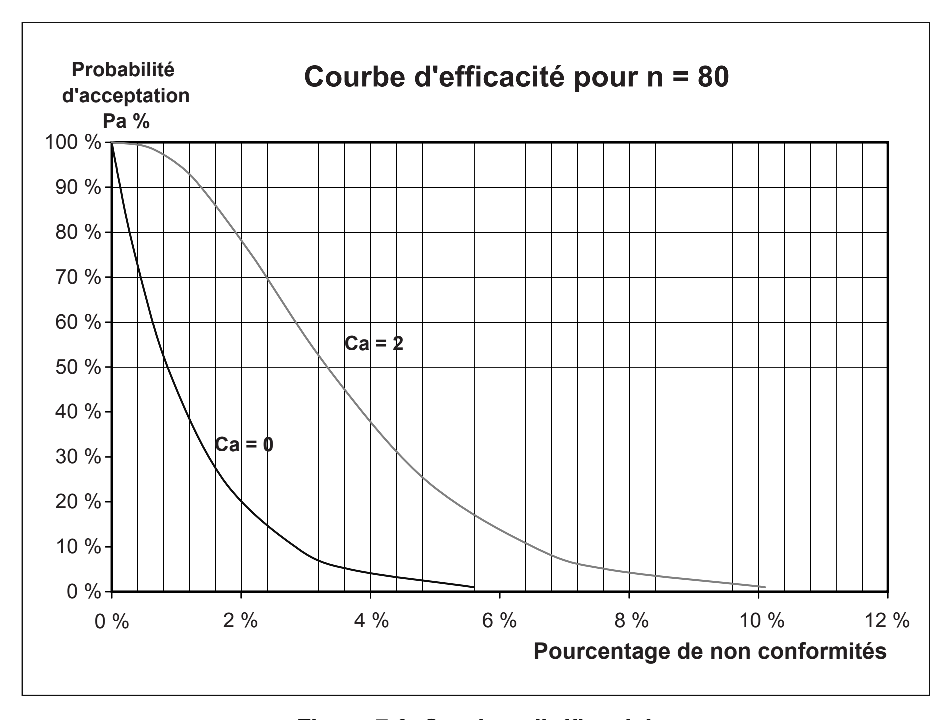


Figure 7.6 Courbes d'efficacité

● Influence de *N* sur la courbe d'efficacité

La courbe d'efficacité est indépendante de la taille *N* du lot à condition que *N* soit nettement plus grand que *n*. Un rapport de 10 est suffisant, ce qui est vrai dans la majorité des cas pratiques.

Cette indépendance de la taille du lot *N* (pour $N/n > 10$), est pour beaucoup un paradoxe, car il n'est pas facile d'admettre que les risques d'erreur dans la décision d'accepter ou refuser un lot ne dépendent que de la taille du prélèvement *n*. D'une façon plus générale, la représentativité d'un échantillonnage est la même quel que soit *N*.

Par exemple, un sondage auprès de 1 000 personnes donne une information tout aussi précise, que la population concernée soit de 10 000 ou d'1 million de personnes.

Le principe sous-jacent est la « non-exhaustivité » du prélèvement, ce qui signifie que, lorsque l'on prélève un produit dans un lot, la proportion de non-conformités ne doit pas se trouver sensiblement modifiée par le fait d'avoir prélevé ces produits.

Par exemple, si l'on prélève n = 80 produits dans un lot de N = 100 000, la proportion de non-conformités avant ou après prélèvement est très probablement quasiment la même. En revanche, si N = 100, au fur et à mesure du prélèvement des n = 80 produits, la proportion de non-conformités des produits restants risque d'évoluer.

Si $N/n < 10$, la condition de non-exhaustivité n'étant pas respectée, la courbe d'efficacité se déduit de la loi hypergéométrique et non plus à la loi binomiale et est alors fonction de la quantité N.

7.7 Tables de plans d'échantillonnage pour une série de lots

7.7.1 Normes ISO 2859-1 et NF 06 022 1

La norme ISO 2859-1, traduite dans la norme française NF X 06 022-1 qui fait partie d'une série de normes statistiques, propose des plans d'échantillonnage. Ces tables, dont l'origine est très ancienne (années 1940), issues de la norme militaire américaine Mil Std 105, sont remarquablement bien faites et fournissent une référence internationale très connue et universellement adoptée. Elles sont particulièrement bien adaptées aux cas du contrôle d'une série de lots, bien que l'on puisse également les utiliser pour un lot isolé. C'est ce cas du contrôle d'une série de lots, cas le plus général, que nous allons examiner principalement.

7.7.2 Le NQA

- **Définition du NQA**

Le « niveau de qualité acceptable » : NQA (*Acceptable Quality Level* : AQL en anglais) est défini dans la norme comme le « niveau de qualité qui, pour le contrôle par échantillonnage, constitue la limite pour une moyenne de processus satisfaisante ».

Le NQA est donc par définition une notion associée au contrôle d'une série de lots. Ce concept de NQA est essentiel et mérite quelques explications.

- **NQA, l'élément de la spécification du produit**

Le NQA est un élément de la spécification du produit relatif aux lots de ces produits. À ce titre, il doit être déterminé par ceux qui rédigent les spécifications, c'est-à-dire les prescripteurs (concepteurs, fabricants…) et non pas le contrôleur. Il peut faire l'objet d'une négociation.

● NQA et le niveau de qualité moyen

Le NQA est la limite considérée comme acceptable pour le « niveau de qualité moyen ». Cette notion de qualité moyenne correspond à ce que nous avons traité au paragraphe 4.2 de ce chapitre. Nous avions pris l'exemple de dix lots successifs avec les résultats suivants (*Tableau 7.6*) présentant une moyenne de 2,36 %.

Tableau 7.6 Proportion réelle de non conformes

N° de lot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P % avant	1	3,1	2,5	0,5	1,5	5,0	2,0	5,0	2,5	0,5

Cette proportion de 2,36 % est une estimation de la qualité moyenne du processus de production au bout de la production de 10 lots.

Imaginons que le NQA soit de 1,5 %. À l'évidence, le processus ne respecte pas cette exigence. Mais que peut-on dire de la qualité de chacun des lots ? Le premier lot est acceptable avec son 1 % de non conformes. Mais le deuxième, avec ces 3,1 %, est-il acceptable ? On ne peut pas le dire car il n'est pas incompatible avec un niveau moyen de 1,5 %. Cela marque bien que le contrôle est envisagé pour une série de lots et que, si un lot a une proportion de non conformes supérieure au NQA, il n'est pas dit « mauvais ». Cependant, le système de contrôle devrait lui donner une assez grande probabilité d'être refusé, contrairement à celui qui aurait une proportion égale ou inférieure au NQA, où le contrôle devrait lui accorder une probabilité aussi faible que possible d'être refusé.

● NQA et zéro défaut

Il peut paraître choquant de tolérer des non conformes dans un lot. Il est de bon ton de dire que le but visé est « zéro défaut », mais cette notion nous paraît peu constructive. Il y a toujours des non conformes, mais à des taux qui doivent être très bas et qui sont effectivement très bas dans la pratique. Seules les caractéristiques relevant de la sécurité des personnes ne peuvent se voir attribuer une tolérance de non-conformité, ne serait-ce que pour des raisons psychologiques.

La tendance est, depuis de très nombreuses années, de fixer des taux exprimés non plus en pourcentages mais en ppm (partie par millions), exprimant par là l'exigence de taux très bas. Par exemple, un taux de 100 ppm correspond à 0,01 % de non conformes.

Si, par exemple, le taux de non conformes d'un procédé de fabrication pour un produit donné est de 100 ppm, il nous paraît constructif, dans le cadre d'une relation clients-fournisseurs, de confirmer ce chiffre dans les spécifications, quitte à se fixer des objectifs d'amélioration. Par exemple, une diminution dans l'année à venir à 50 ppm, plutôt que de se voiler la face et déclarer que le niveau exigé est zéro défaut, alors que le procédé de fabrication ne le permet pas encore.

En tout état de cause, fixer un NQA n'autorise en aucun cas la production de non conformes, il ne s'agit que d'une tolérance.

- **NQA, une base pour le contrôle par échantillonnage**

Examinons la définition du NQA que nous avons donnée au paragraphe 7.2.2 : elle commence par « le NQA est un niveau de qualité qui, pour le contrôle par échantillonnage… ». Cette notion étrange révèle en fait une difficulté majeure. Le problème vient de ce que le calcul des probabilités nous montre, à travers le calcul des courbes d'efficacité, que contrôler des taux très faibles implique de prélever des quantités tout à fait irréalistes. Alors, faut-il accepter des taux de non conformes importants sous prétexte de la difficulté à les vérifier ? Que se passe-t-il si l'utilisateur est confronté à un niveau de non conformes acceptable pour le contrôle mais excessif à l'utilisation ?

- **Recherche d'une solution de compromis**

Vis-à-vis de ce problème qui ne peut avoir de solution parfaitement satisfaisante, notre position est de fixer des NQA les plus petits possible compatibles avec les tables, tolérables à l'utilisation et de les compléter par des taux de ppm qui ne servent pas de base au contrôle mais qui, sur le long terme, fixent le niveau acceptable à l'utilisation des produits. Ces notions n'ont de sens que sur des grandes séries faisant l'objet d'une certaine continuité. C'est ce que l'on trouve dans des métiers tels que l'électronique ou l'automobile. Cette notion implique une relation étroite client-fournisseur pour négocier ces niveaux d'exigences en ppm qui, dans une bonne logique d'amélioration continue, méritent d'être revus périodiquement à la baisse. Parfois, le client demandera aux fournisseurs de lui donner ses plans d'amélioration des taux de ppm, plans qui peuvent également faire l'objet d'une négociation. Cette approche implique pour le client de relever en production les taux de non conformes sur les produits achetés, de les enregistrer et de les communiquer au fournisseur, ce qui nécessite une gestion parfois assez complexe. Ayant appliqué abondamment un tel processus, nous pouvons affirmer qu'il est très efficace.

Il faut noter une nuance importante. Le NQA est nécessairement relatif à des non-conformités par rapport à une spécification, alors que les ppm sont en général un constat à l'utilisation que le produit ne fonctionne pas, ce qui relève plus de la conformité aux besoins du client. Bien que les exigences de la spécification soient censées traduire les besoins des clients, il peut y avoir divergence.

● Classement des NQA

Le choix du NQA est avant tout fonction de l'importance de la caractéristique ou de la gravité des non-conformités.

Dans un lot de produits, on peut trouver des non-conformités de nature différente et la question se pose de définir un NQA pour chaque caractéristique ou pour l'ensemble des caractéristiques. En pratique, il faut utiliser les deux approches.

Prenons l'exemple d'un téléphone. L'ensemble de ses caractéristiques (qualité sonore, bruit parasite, dimensions, défauts d'aspect…) peuvent être regroupées en trois catégories selon l'importance de la non-conformité :

- A pour celles qui apportent une gêne importante pour le client,
- B une gêne modérée,
- C une gêne peu importante, autant de qualificatifs qui doivent faire l'objet de définitions précises.

On peut imaginer qu'une non-conformité vis-à-vis d'une caractéristique puisse être classée dans les trois catégories selon l'importance de la non-conformité, par exemple A pour un bruit parasite important et C pour un bruit très faible. On peut sophistiquer le classement en distinguant les caractéristiques fonctionnelles des non fonctionnelles. Par exemple, la qualité sonore est fonctionnelle, mais la plupart des dimensions choisies n'ont probablement pas un caractère fonctionnel.

Le Tableau 7.7 propose un exemple (les valeurs de NQA sont conformes à celles des normes ISO 2859-1 et NF 06 022-1).

Certaines caractéristiques peuvent difficilement être regroupées mais peuvent faire l'objet d'un NQA spécifique. Par exemple, si le produit doit résister à des contraintes environnementales telles que celles d'un test normalisé à l'humidité, il est difficile de l'associer aux autres caractéristiques, à la fois par souci d'homogénéité et en raison de la nécessité de faire un prélèvement spécifique pour ce type de contrôle. On note que ce test est par nature destructif, ce qui rend difficile le regroupement avec d'autres contrôles.

Sur ce dernier point, il existe une relation évidente entre la sévérité d'un test et le nombre de non-conformités. Notre position, qui ne fait pas l'unanimité,

privilégie des tests plus sévères, mais avec des NQA plus élevés, ce qui permet de réduire les quantités à prélever.

Tableau 7.7 Exemple de relation entre l'importance des caractéristiques et NQA

Catégorie de caractéristique	Importance	NQA
Caractéristiques fonctionnelles	A B C	0,1 % 0,65 % 1,5 %
Caractéristique non fonctionnelle	A B C	0,25 % 1,50 % 2,5 %

7.8 Tables pour le contrôle par échantillonnage

7.8.1 Principe

● Norme NF ISO 2859-1

Rappelons que cette norme[2] est destinée au contrôle d'une succession de lots sur lesquels on souhaite s'assurer que la « qualité moyenne du processus[3] » est inférieure ou égale à la valeur spécifiée du NQA.

Notre propos n'est pas de décrire cette norme dans tous ses détails mais d'en expliquer les principes de base. Ces normes fournissent des tables permettant de déterminer les plans de contrôle les mieux adaptés.

● Courbe d'efficacité et NQA

Choisir un contrôle, c'est choisir sa courbe d'efficacité. Le premier point est de choisir une courbe d'efficacité en fonction du NQA avec comme principe de base : un lot ayant une proportion de non conformes égale au NQA doit avoir une forte probabilité d'être accepté. La norme fixe une probabilité aussi proche que possible de 95 %.

2. Indice de classement : X 06 022-1.
3. Il s'agit concrètement de la proportion moyenne de non-conformes ou de non-conformités sur une série de lots.

● **Risque client et risque fournisseur**

Sur la Figure 7.7, on distingue deux points qui mettent en évidence :

– le risque fournisseur α est égal ici à 5 % (100 % – 95 %) qui représente le risque pour le fournisseur de se voir refuser un lot qui aurait une proportion de non conformes égale au NQA ;

– le risque client β est égal ici à 10 %, qui représente le risque pour le client de se voir refuser un lot qui aurait une proportion de non conformes nettement supérieure au NQA. Ce point est également appelé QRC (Qualité du risque client).

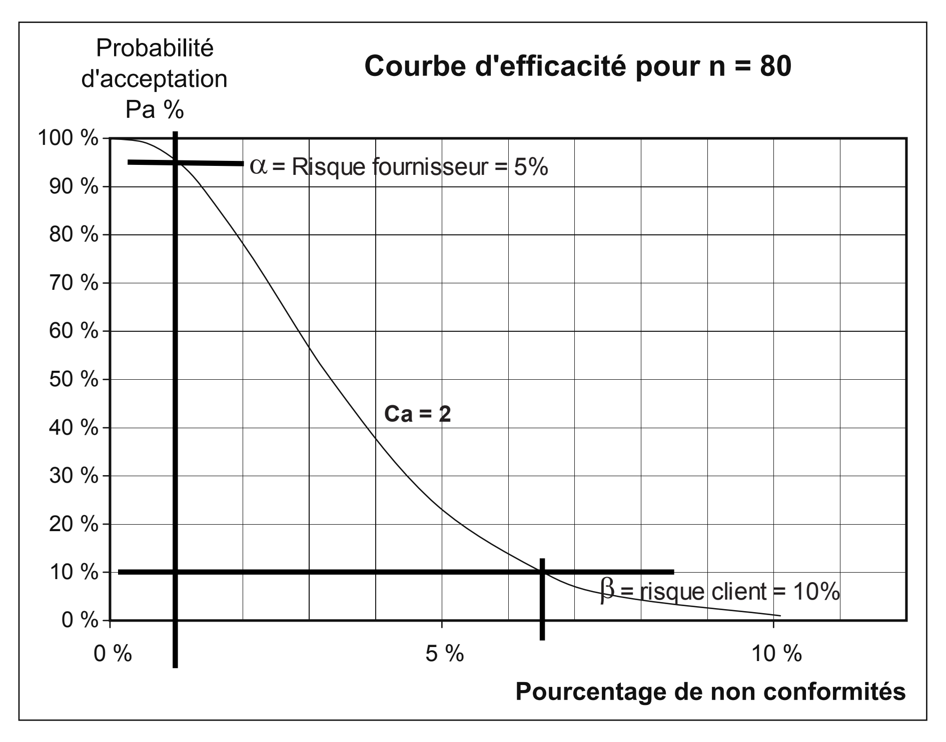


Figure 7.7 « Risque client » et « risque fournisseur »

● **Plusieurs courbes d'efficacité pour un même NQA**

Pour un même NQA, une table de la norme propose des plans d'échantillonnage plus ou moins sévères, c'est-à-dire des plans ayant très approximativement le même NQA (ici 1 %), donc un même risque fournisseur mais une pente plus

ou moins sévère, c'est-à-dire un risque client plus ou moins fort. Le graphique de la Figure 7.8 donne les courbes correspondant aux plans suivants.

Tableau 7.8 Exemples de plans de contrôle

	***n* = 80, Ca = 2**	***n* = 50, *Ca* = 1**	***n* = 125, *Ca* = 3**
NQA (95 %)	1.03	0.712	1.09
QRC (10 %)	6.52	7.56	5.35

Mais l'on constate que plus la quantité *n* augmente, passant de 50 à 80 puis à 125, plus le contrôle est sévère et plus il coûte cher dans la mesure où le nombre de produits contrôlés influe sur le coût du contrôle (*Figure 7.8*).

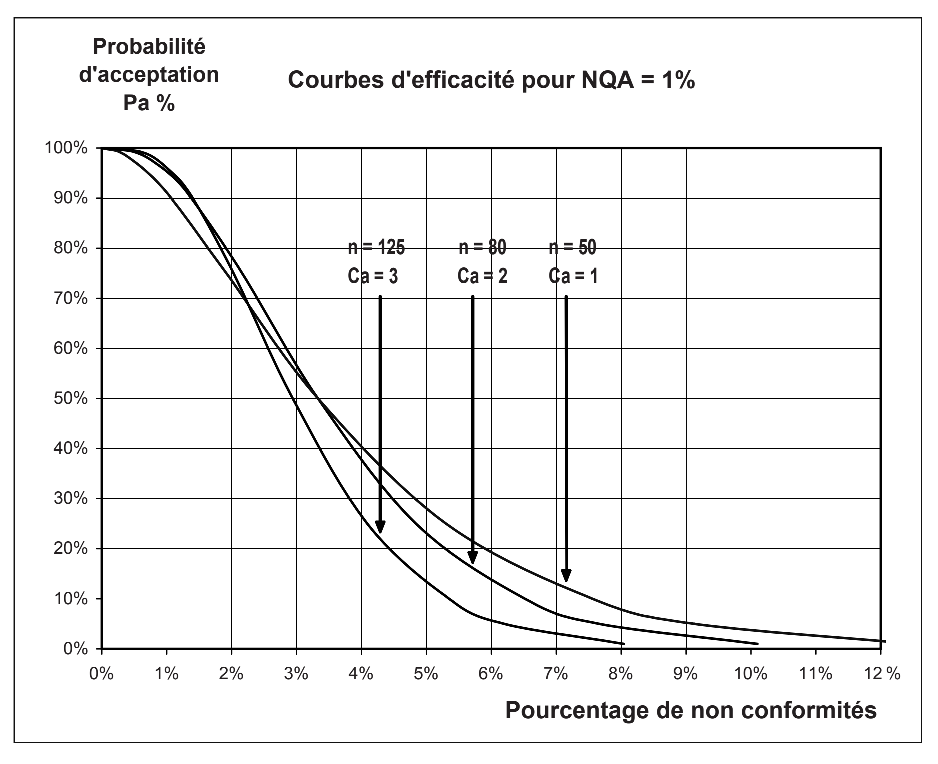


Figure 7.8 Exemple de courbes d'efficacité associées aux plans de contrôle

7.8.2 Choix d'un plan de contrôle

● Principe de détermination des plans

La norme NF ISO 2859-1 propose des plans d'échantillonnage en fonction de trois principes :

– La courbe d'efficacité doit avoir une « probabilité d'acceptation » égale à environ 95 % pour la valeur spécifiée du NQA. Cela signifie que, si la qualité moyenne du processus est égale au NQA, la plupart des lots seront acceptés. Cette valeur de 95 % est en fait un ordre de grandeur très approximatif, un examen approfondi des tables montre que cette valeur peut aller de 88 à 98 %.

– Plus le coût du contrôle est cher, moins grande sera la quantité prélevée *n* et *vice versa*. Cela signifie que plus le contrôle est cher, plus faible sera la pente de la « courbe d'efficacité », laissant ainsi une plus grande probabilité d'acceptation aux lots ayant une forte proportion de non conformes.

– Plus les risques associés aux non-conformités sont grands, plus faible sera la pente de la courbe d'efficacité laissant ainsi une plus faible probabilité d'acceptation aux lots ayant une forte proportion de non conformes et *vice versa*.

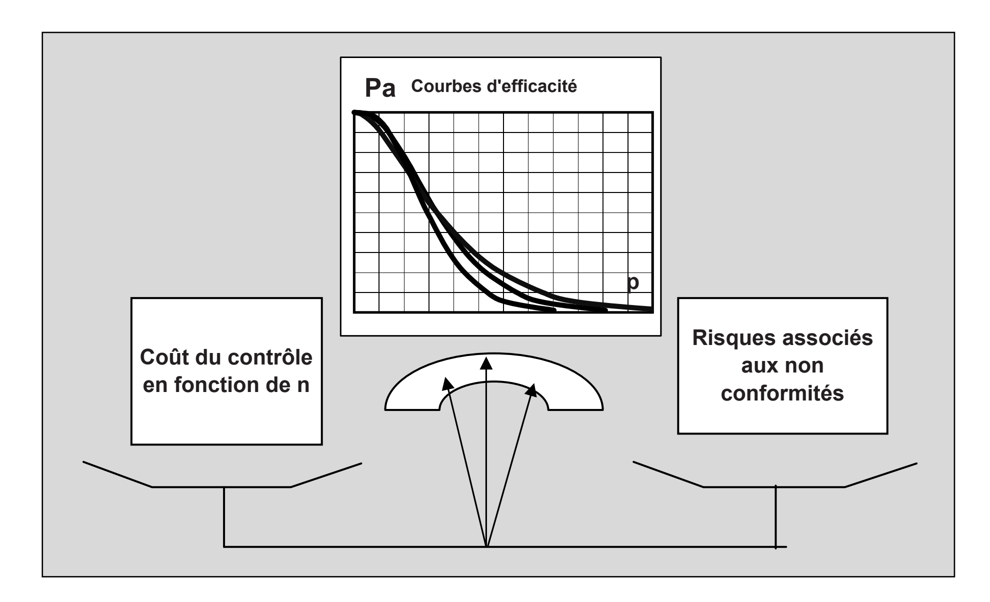


Figure 7.9 Le contrôle : un compromis coût/risque

On peut résumer le principe d'ensemble par un plan de base fixé par le NQA et dont la courbe d'efficacité choisie correspond à un équilibre entre le coût du contrôle et l'importance des risques associés aux non conformes comme pour une assurance où l'on accepte de payer d'autant plus cher que le risque encouru est important. C'est ce que nous avons représenté sous forme d'une balance à la Figure 7.9. De plus, plus le niveau de qualité se révèle mauvais, plus la sévérité augmente, comme un malus pour une assurance, faisant ainsi une pression sur le producteur d'autant plus grande que sa qualité est mauvaise.

- **Nature des risques associés aux non-conformités**

Différents risques sont pris en compte :

– **La gravité de la non-conformité**, c'est-à-dire l'importance des conséquences d'une non-conformité à l'utilisation du produit.

– **La taille du lot N**. En effet, ne pas arrêter un lot mauvais est d'autant plus grave que le lot est de taille importante ; ce point est souvent l'objet de confusion, car la tendance est de croire que, d'un point de vue statistique, il faut prélever une quantité plus grande si le lot est de taille importante ; or il n'en est rien.

– **La confiance que l'on a dans le fournisseur** (étant entendu que celui-ci peut être interne ou externe). En effet, on peut estimer que l'on court un plus grand risque avec un fournisseur qui n'a pas fait ses preuves ou qui a déjà livré des lots non conformes.

- **Fonctionnement des tables**

La Figure 7.10 illustre le fonctionnement des tables de la norme qui propose les étapes suivantes sur un cas particulier.

1. Définir un niveau suivant l'échelle ci-dessous :

S1	S2	S3	S4	I	II	III

Ces niveaux vont de S1, permettant un prélèvement d'une quantité très réduite de produits, à III, imposant à l'inverse une quantité importante. Le choix d'un niveau résulte d'un compromis entre la « gravité des non-conformités » et le « coût du contrôle ».

Le choix est laissé à l'appréciation du contrôleur. Chaque entreprise déterminera des grilles facilitant ce choix. Le Tableau 7.9 montre le principe de ce choix.

2. En fonction du niveau et de la taille du lot, la table donne à travers un système de lettres-code la quantité n à prélever

3. En fonction de cette quantité et du NQA spécifié, la table donne le plan d'échantillonnage déterminé par : *n* et *Ca*.

Tableau 7.9 Principe du choix du niveau de contrôle

Gravité des non conformités	Coût du contrôle	Lettre code	
		III II I S4 S3 S2 S1	Gravité des non conformités → Grande / Moyenne / Faible Coût du contrôle → Faible / Moyen / Fort

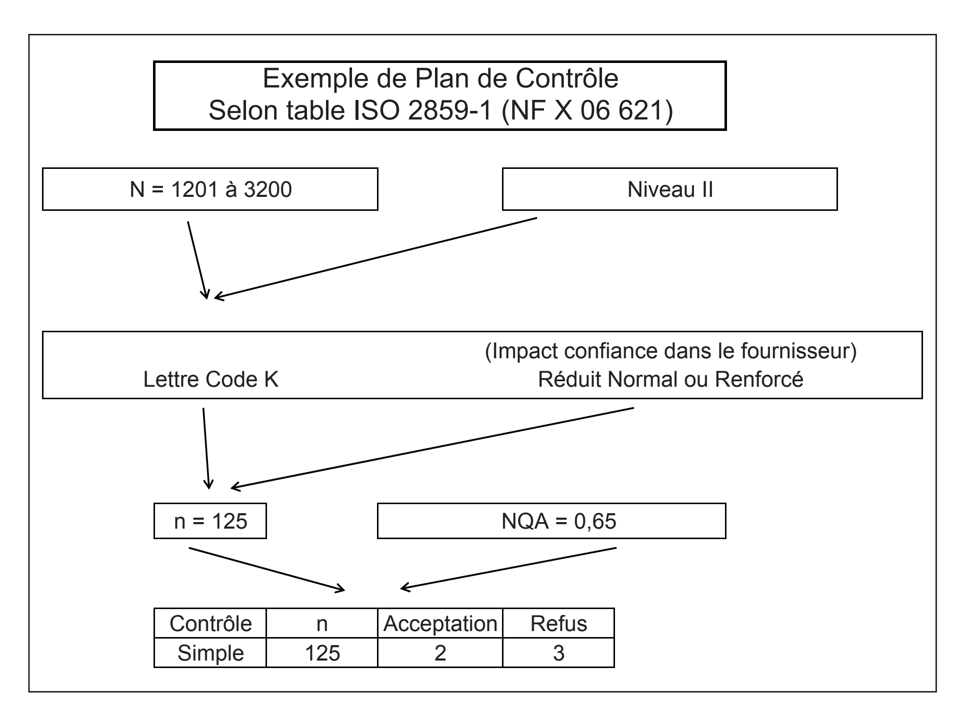


Figure 7.10 Schéma de fonctionnement des tables

4. Un système quelque peu complexe permet de déterminer des plans plus sévères (pente de la courbe d'efficacité plus forte) lorsque le fournisseur a cumulé un certain nombre de lots refusés et, inversement, des plans moins sévères (pente de la courbe d'efficacité moins forte) lorsque le fournisseur a cumulé un certain nombre de lots bons. Ceci permet de prendre en compte le risque associé à la confiance dans le fournisseur. Cela se traduit par un contrôle, réduit, normal ou renforcé comme indiqué sur la Figure 7.10.

On voit ainsi comment la table prend en compte ce compromis entre le coût du contrôle, d'une part, et l'ensemble des risques associés aux non-conformités, d'autre part.

● **Plans doubles ou multiples**

1-Principe

Nous avons présenté jusqu'ici les plans simples avec un prélèvement unique n :

- si $k \leq Ca$, le lot est accepté ;
- si $k > Ca$, le lot est refusé.

La table propose également des plans doubles ou multiples avec des échantillonnages plus réduits n, mais avec le risque de les renouveler en fonction des résultats.

La table propose pour un contrôle donné le choix entre un contrôle simple, un contrôle double et un contrôle multiple. Ces trois contrôles ont à peu près la même courbe d'efficacité mais, en contrepartie d'une procédure un peu lourde, permet en moyenne de réduire d'une façon sensible la quantité totale moyenne à contrôler.

2-Prélèvement double

- Si $k \leq Ca$ le lot est accepté (*Ca* critère d'acceptation) ;
- Si $k \geq Cr$ le lot est refusé (*Cr* critère de rejet) ;
- Si $k < Cr$ et $k > Ca$, un deuxième prélèvement doit être fait de la même quantité et la décision est prise à partir des résultats sur le cumul des deux prélèvements.

Le Tableau 7.10 propose :

- Prélèvement simple : $n = 125$; $Ca = 2$
- Prélèvement double : $n = 80$; $Ca = 0$; $Cr = 3$. Dans ce cas, si le prélèvement donne :

- 0 non conforme : on accepte,
- 3 ou plus de non conformes : on refuse,
- 1 ou 2 non conformes : on refait un autre prélèvement de 80 produits et la totalité des non conformes en provenance des 160 produits prélevés doit être inférieure à 4 pour que le lot soit accepté.

On voit que le prélèvement simple impose n = 125 produits à contrôler et le prélèvement double uniquement n = 80, au risque parfois de devoir prélever n = 160. Le calcul des probabilités montre qu'en moyenne, on prélève sensiblement moins de 125 produits.

3-Prélèvement multiple

C'est la généralisation du cas du prélèvement double qui permet de réduire en moyenne encore plus les quantités à prélever (*Tableau 7.10*).

Tableau 7.10 Plan de contrôle simple, double et multiple

Différents types de contrôle

Contrôle	*n*	*n* cumulé	Acc,	Refus
Simple	125	125	2	3
Double	80	80	0	3
	80	160	3	4
Multiple	32	32	0	2
	32	64	0	3
	32	96	0	3
	32	128	1	4
	32	160	2	4
	32	192	3	5
	32	224	4	5

7.8.3 Contrôle par mesures

● **Différentes catégories de non conformes**

Les caractéristiques d'un produit se classent en deux catégories d'un point de vue statistique :

– les caractéristiques mesurables (par exemple, la longueur d'une pièce) ;

– les caractéristiques par attribut (par exemple, l'absence de taches).

Jusqu'ici nous n'avons pas fait de différence entre ces deux catégories. Notamment le nombre *k* de non conformes peut couvrir ces deux catégories. Les caractéristiques mesurables permettent un contrôle très économique en utilisant une méthode dite de contrôle par mesures.

● Contrôle par mesures

Si l'on s'intéresse au contrôle d'une caractéristique, il est possible de réduire le prélèvement *n* d'une façon considérable en partant des propriétés statistiques des résultats obtenus par un processus de production. Lorsque ce processus est bien maîtrisé, celui-ci donne souvent pour une caractéristique des résultats distribués selon une loi de Gauss.

Examinons l'exemple de la longueur d'une pièce produite en série et de sa distribution statistique représentée sur la Figure 7.11).

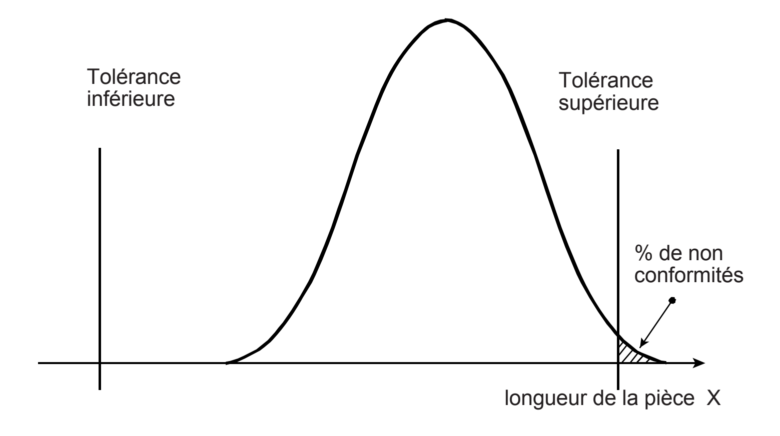


Figure 7.11 Non-conformités pour une caractéristique mesurable

Sans entrer dans les détails de la loi de Gauss, en disposant de quelques résultats (par exemple, $n = 20$ pièces), nous pouvons, à partir du calcul de la moyenne et de l'écart type des résultats, estimer avec une assez grande précision le pourcentage de pièces hors tolérances et, par suite, la confronter à la valeur du NQA spécifiée.

La norme ISO 3951 (Sections 3 et 4), qui correspond à la NF X 06-023 (à quelques détails près), propose des plans d'échantillonnage en reprenant tous les principes des normes NF ISO 2859-1, mais avec des quantités prélevées bien inférieures pour la même efficacité, étant entendu que la décision d'acceptation

ou de refus ne repose plus sur un critère d'acceptation *Ca* ou de rejet *Cr*, mais sur une estimation de la proportion de non conformes à partir du calcul de la moyenne et de l'écart type des résultats de mesure.

Il faut insister sur le fait qu'il ne s'agit pas de vérifier la conformité des caractéristiques statistiques mais bien d'une proportion de non-conformités.

7.8.4 Contrôle d'un lot isolé

Il existe des normes spécifiques, notamment la norme ISO 2859-2 et la norme NF X 06-028. Mais une solution simple est d'utiliser les normes NF ISO 2859-1 en remplaçant le NQA par un niveau de « qualité limite » (QL). On choisit alors une courbe d'efficacité dont le QRC (qualité du risque client : point correspondant à une probabilité d'acceptation du lot de 10 %) est égal à ce niveau QL.

7.9 Gestion pratique des contrôles dans l'industrie

7.9.1 Gestion d'un contrôle

La mise en place d'un contrôle implique de déterminer les points suivants :

- **Le choix du type de contrôle** : unitaire (100 %) ou par prélèvement.
- **Le choix des caractéristiques à vérifier** : il faut privilégier les caractéristiques fonctionnelles et, parmi celles-ci, les plus importantes pour le client. Le Tableau 7.11 illustre le problème du choix des quantités de produits à contrôler en fonction de leur importance mais surtout des possibilités physiques et économiques de contrôle : par exemple le contrôle pourrait porter sur la totalité *N* des produits pour les caractéristiques fonctionnelles les plus importantes, sur une quantité relativement réduite (n_2 dans le tableau) pour certaines caractéristiques moins importantes et plus chères à contrôler et sur des quantités très réduites (n_1 dans le tableau) pour le contrôle de caractéristiques chères à contrôler et notamment pour les contrôles des caractéristiques de fiabilité qui sont nécessairement destructifs.
- **Le choix de la fréquence des contrôles** s'il s'agit d'un contrôle par échantillonnage : par exemple tous les lots ou un lot sur dix, toutes les heures en production, tous les mois pour certains contrôles de fiabilité… et à chaque contrôle, le nombre de produits *n* à contrôler parmi les *N* produits concernés par le contrôle.
- **Le choix de la méthode de mesure** (caractéristique mesurable) **ou d'appréciation** (caractéristique par attribut). Les méthodes de mesure ou

Tableau 7.11 Répartition des quantités contrôlées en fonction des caractéristiques

n° produit	Caractéristiques du produit				
	Qualité initiale Caractéristiques		Fiabilité		
	Principales	Complémen-taires	Fonction-nement	Résistance mécanique	Résistance climatique
1 – – n_1					
1 – – n_2					
1 – – N					

d'appréciation peuvent éventuellement être différentes de celles de la spécification sous réserve d'établissement d'une corrélation ; une méthode peut être moins précise mais beaucoup plus économique. Cette différence de méthode peut surprendre, mais il est important de noter que si la spécification du produit fait référence à une méthode de mesure, la raison en est que l'expression d'une exigence peut n'avoir de sens que si on lui associe une méthode de mesure, qui d'ailleurs sera la référence en cas de litige sur une non-conformité.

– **Les informations à fournir à partir des résultats du contrôle** : il faut en définir la nature, par exemple les taux de défauts par lot ou par jour, la distribution statistique des valeurs mesurées, l'analyse des défauts, etc. Il est également important de définir les destinataires, nous nous devons d'insister sur ce point. car nous avons. Nous avons précédemment mis fortement en

valeur à quel point l'utilité d'un contrôle repose sur le retour d'information. Il faut alors distinguer les destinataires qui doivent recevoir une information synthétique pour action à long terme (la hiérarchie par exemple) de ceux qui ont besoin d'une information analytique en vue des actions correctives.

– **Le mode opératoire**, qui permet d'assurer la rigueur dans sa bonne exécution.
– **La gestion des actions correctives**. Encore une fois, on ne peut qu'insister sur cet aspect essentiel.

Les responsabilités doivent être définies clairement sur les points suivants :

- la détermination des contrôles ;
- leur mise en place ;
- leur réalisation ;
- la prise des décisions concernant les produits non conformes. Celles-ci peuvent être prédéterminées en fonction des situations : refus d'une pièce ou d'un lot, possibilités et conditions de dérogation, réparation, retraitement, tri, etc. ;
- la réalisation des actions correctives.

7.9.2 Autocontrôle

Une bonne façon de sensibiliser un service ou les personnes à la qualité est de leur confier la responsabilité du contrôle de leur travail. C'est ce que l'on appelle l'autocontrôle.

Dans cet esprit, on confie la responsabilité du contrôle :

– aux services de développement pour le contrôle de la conception ;
– à la production pour le contrôle du produit aux différents stades ;
– aux opérateurs de production pour leur propre travail ;
– aux fournisseurs pour le contrôle de leurs produits (ce qui permet de supprimer le contrôle réception) ;
– aux services achats pour les éventuels contrôles de réception, partant du principe que ces services sont en charge d'acheter des produits répondant au niveau de qualité spécifié.

Notons le statut particulier du contrôle de sortie fait pour le compte de la direction par le service qualité. On peut dire qu'il s'agit, pour la direction, de son autocontrôle.

L'autocontrôle implique d'accorder aux différents acteurs les moyens en personnel, matériel, formation, temps disponibles… Cela suppose de la part des acteurs d'être bien sensibilisés à leur rôle en matière de qualité et d'avoir atteint une certaine maturité dans ce domaine.

Par exemple, confier les contrôles de production à un responsable de fabrication qui laisserait partir des produits dont les contrôles ont montré qu'ils n'avaient pas le niveau de qualité requis peut se révéler lourd de conséquences.

On voit que si l'idée de l'autocontrôle est excellente, son application nécessite un travail en profondeur.

En tout état de cause, l'autocontrôle implique toujours un contrôle à un niveau supérieur.

Par exemple, un opérateur en autocontrôle doit savoir que si son travail n'est pas bien exécuté cela se verra probablement à un stade ultérieur et qu'à terme la hiérarchie finira par le découvrir.

8

L’incertitude de mesure : principes et vocabulaire

8.1 Incertitude de mesure dans un contexte industriel

L’obtention de la qualité des produits implique de faire des mesures de leurs caractéristiques à de nombreux stades de leur réalisation : en conception, en réception, en production à des stades semi-ouvrés et produit fini, avant livraison. De même, la moindre étude technique implique des mesures. Chacun sait à quel point la pratique de la qualité est associée à la mesure.

L’ensemble de ces mesures conduit à des décisions. Cela peut-être l’acceptation ou le refus d’un produit, d’un lot, d’une production…, la modification des conditions de production ou de la conception du produit, etc. Or ces décisions présupposent une bonne qualité de la mesure et une bonne gestion des équipements de mesure, ce qui n’est pas toujours le cas car le problème est assez complexe.

Examinons quelques cas de risques de mauvaises décisions :

– au contrôle réception, le risque est de refuser à un fournisseur un lot bon ou d’accepter un lot mauvais ;

– en production dans le cadre d'une démarche SPC (*Statistical Process Control*), le risque est de modifier à tort le réglage des machines et de produire des pièces mauvaises ;
– en conception, le risque est de considérer bonne une conception qui ne l'est pas ;
– dans un plan d'expériences, le risque est d'aboutir à des conclusions erronées lors d'une étude.

L'attitude la plus commune devant un résultat de mesure consiste à lui faire entièrement confiance. Si l'on se place sous l'angle de la vie courante, cette attitude est spontanée : lorsque l'on prend de l'essence dans une station-service, on a le réflexe de considérer comme exact le chiffre affiché. De même, lorsqu'un commerçant pèse un produit, nous considérons spontanément le chiffre annoncé comme exact. Il n'y a que la mesure de vitesse des voitures par un radar qui est contestée ! Bien sûr, nous ne nous intéressons pas au cas marginal de la volonté de falsifier un résultat.

L'expérience montre que, lorsque l'on analyse la qualité des dispositifs de mesure dans l'industrie, on est parfois étonné de constater des déficiences importantes ou même une inaptitude du dispositif de mesure à fournir une bonne mesure.

Le monde industriel présente quelques spécificités dans le domaine de la mesure :

– des mesures nombreuses et répétitives ;
– beaucoup de personnes différentes concernées et n'ayant pas, pour la plupart, de formation très poussée dans le domaine de la mesure ;
– un très grand nombre d'appareils de mesure et d'équipements de mesure à gérer.

Or, le monde de la mesure est d'une grande complexité, avec une littérature abondante mais souvent difficile à interpréter, des normes très nombreuses et volumineuses.

Nous nous proposons d'étudier le monde de « l'incertitude de mesure » d'une façon aussi simple et pratique que possible. Il ne s'agit nullement d'aborder dans sa totalité le monde complexe de la métrologie mais de donner les principes essentiels permettant de gérer ce problème dans le contexte industriel que nous venons d'évoquer en prenant même le risque d'une certaine vulgarisation.

8.2 Quelques définitions préliminaires

8.2.1 Les normes

Nous nous inspirons des normes suivantes :

– Norme NF X 07-001 : Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
– NF ISO 5725 : Application de la statistique – Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure
  - Partie 1 : Principes généraux et définition.
  - Partie 2 : Méthodes de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée.
  - Partie 3 : Mesure intermédiaire de la fidélité d'une méthode de mesure normalisée.
  - Partie 4 : Méthode de base pour la détermination de la justesse d'une méthode de mesure normalisée.
  - Partie 5 : Méthodes alternatives pour la détermination de la fidélité d'une méthode de mesure normalisée.
  - Partie 6 : Utilisation dans la pratique des valeurs d'exactitude.

8.2.2 Les instruments et systèmes de mesure

Il nous faut d'abord distinguer :

> **NF X 07-001**
>
> **§ 4.1 Instrument de mesure, appareil de mesure :**
>
> Dispositif destiné à être utilisé pour faire des mesurages, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes.

Par exemple un ampèremètre destiné à mesurer un courant électrique.

> **NF X 07-001**
>
> **§ 4.5 Système de mesure :**
>
> Ensemble complet d'instruments de mesure et autres équipements assemblés pour exécuter des mesurages spécifiés.

Par exemple, pour mesurer un bruit, on utilisera un capteur, des circuits électroniques d'amplification et de traitement du signal, un logiciel de calcul.

Nous resterons dans ce document à un niveau suffisamment général pour que les définitions ou les méthodes proposées s'adaptent aux deux domaines.

8.2.3 Les dispositifs de mesure

La norme ISO 9001:2008 emploie les termes « dispositifs de surveillance et de mesure » et d'« équipements de mesure » qui, l'un comme l'autre, nous paraissent correspondre à cette définition du système de mesure.

Le terme « dispositif » n'est pas spécifiquement défini dans la norme ISO ; cependant, au sens de cette norme, les « dispositifs » comprennent aussi bien les « équipements », qui sont du domaine physique traditionnel, que tout ce qui permet d'évaluer un résultat qualité : par exemple, l'efficacité d'un processus ou sa performance, la satisfaction des clients, etc. Ici nous nous intéressons exclusivement au premier domaine, sachant que des extrapolations au deuxième sont toujours possibles.

8.2.4 L'incertitude de mesure

L'incertitude de mesure est définie comme :

> **NF X 07-001**
>
> **§ 3.9 Incertitude de mesure**
>
> Estimation caractérisant l'étendue des valeurs dans laquelle se situe la valeur vraie d'une grandeur mesurée.

Cette estimation peut prendre la forme d'un écart type ou d'un multiple d'écart type[1] ou la demi-largeur d'un intervalle de niveau de confiance.

Prenons l'exemple d'une mesure de puissance d'un appareil électrique $P = UI$ à l'aide d'un voltmètre mesurant la tension U et d'un ampèremètre mesurant le courant I. Nous avons obtenu :

$P =$ 200 volt × 12 ampères = 264 watts

L'incertitude peut s'exprimer sous forme la forme :

– d'un écart type : 0,77 watt ;

– d'une plage d'incertitude : ± 2 × 0,77 = 1,54 watt (soit entre 262,46 et 265,54 watts).

1. L'écart type est une valeur caractérisant la dispersion d'une variable aléatoire ou de résultats expérimentaux. La variance est le carré de l'écart type. Plus généralement le lecteur peut se reporter au chapitre 10 sur le traitement statistique des données.

Cela part du principe que le résultat de mesure est aléatoire autour de la valeur vraie qui ne pourra pas être connue. En général, on admet que ce résultat aléatoire suit une loi de Gauss (*Figure 8.1*). Or, une variable respectant cette loi a 95 % (environ) de chances de se trouver dans un intervalle de ± 2 écarts types. En conséquence, il y a 95 % de chances que l'intervalle «1,54 watt comprenne la valeur vraie. Le choix de 95 % est réaliste et est celui que l'on admet en général, soit un risque d'erreur de 5 %.

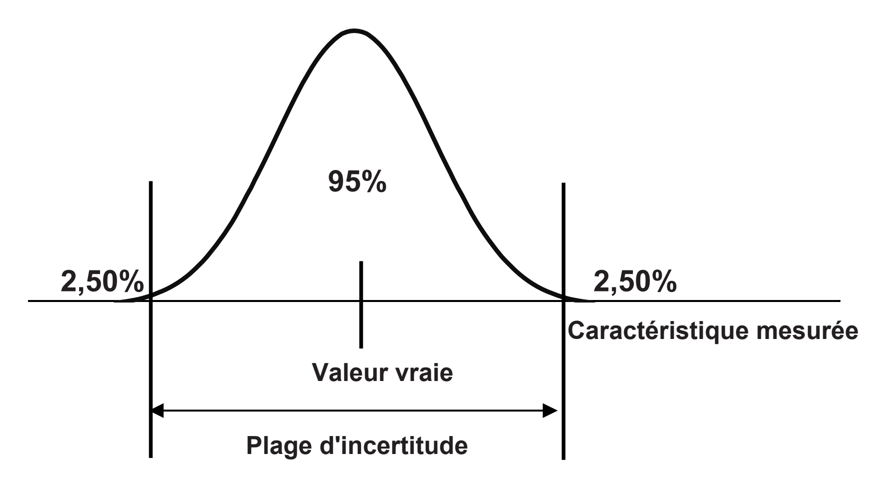


Figure 8.1 Plage d'incertitude et loi de Gauss

8.3 Composantes de l'incertitude

8.3.1 Une approche simplifiée

L'incertitude a de nombreuses causes (ou composantes) spécifiques à chaque système de mesure. Dans un souci de simplification, décomposons dans un premier temps cette plage d'incertitude en deux parties seulement :

– une erreur systématique ;

– une erreur aléatoire.

Si l'on répète plusieurs fois la même mesure dans un temps relativement court, elle sera affectée d'une erreur systématique qui peut s'expliquer par de nombreuses causes : étalonnage défectueux des appareils de mesures, biais systématiques dans la mesure.

Par exemple dans notre mesure d'une puissance, le voltmètre et l'ampèremètre modifient légèrement le circuit électrique, etc.

L'erreur aléatoire provient de nombreuses causes .

Par exemple, la qualité des contacts électriques peut varier d'une mesure à une autre, la température extérieure sera changeante, même dans un temps très court, l'opérateur peut avoir une influence elle-même aléatoire sur la façon de brancher les appareils…

La Figure 8.2 illustre cette décomposition. L'erreur aléatoire est en général régie par la loi de Gauss. Autour d'une valeur 0, elle va ajouter une valeur positive ou négative, conformément à cette loi. Notre graphique représente une valeur positive.

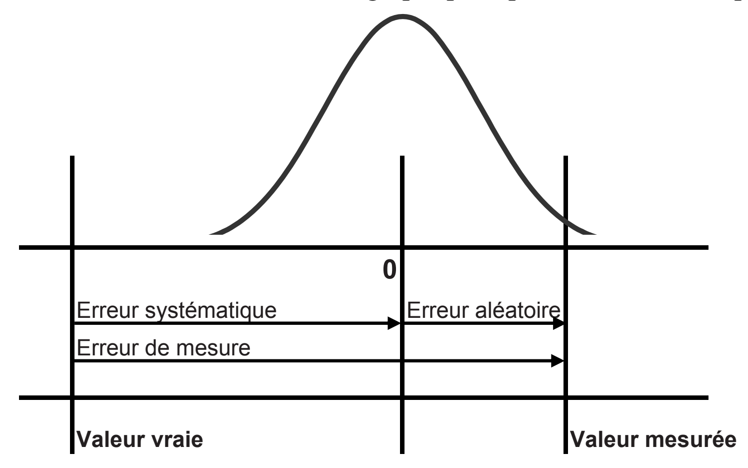


Figure 8.2 Erreur systématique et erreur aléatoire

Sur une période assez longue, cette erreur systématique peut elle-même être considérée comme aléatoire mais, dans un souci de simplification, considérons-la, dans cette première approche, comme fixe sur une période assez courte.

Si l'on se place au niveau des concepts, les normes définissent pour les appareils de mesure les termes suivants.

8.3.2 La justesse

À l'erreur systématique correspond le concept de justesse défini ainsi :

NF ISO 5725-1

§ 3.7 Justesse

Étroitesse de l'accord entre la moyenne obtenue à partir d'une large série de résultats d'essai et une valeur de référence acceptée.

Par étroitesse, il faut entendre : dans quelle mesure l'écart entre les valeurs obtenues et les valeurs vraies est faible. Pratiquement, on l'obtient à partir de plusieurs mesures correspondant à des étalons de valeurs différentes couvrant l'étendue du champ de mesure de l'appareil de mesure.

On utilise alors un calcul de régression pour chercher la meilleure droite ou courbe passant à travers les résultats expérimentaux (*voir chapitre 10 sur le traitement statistique des données*).

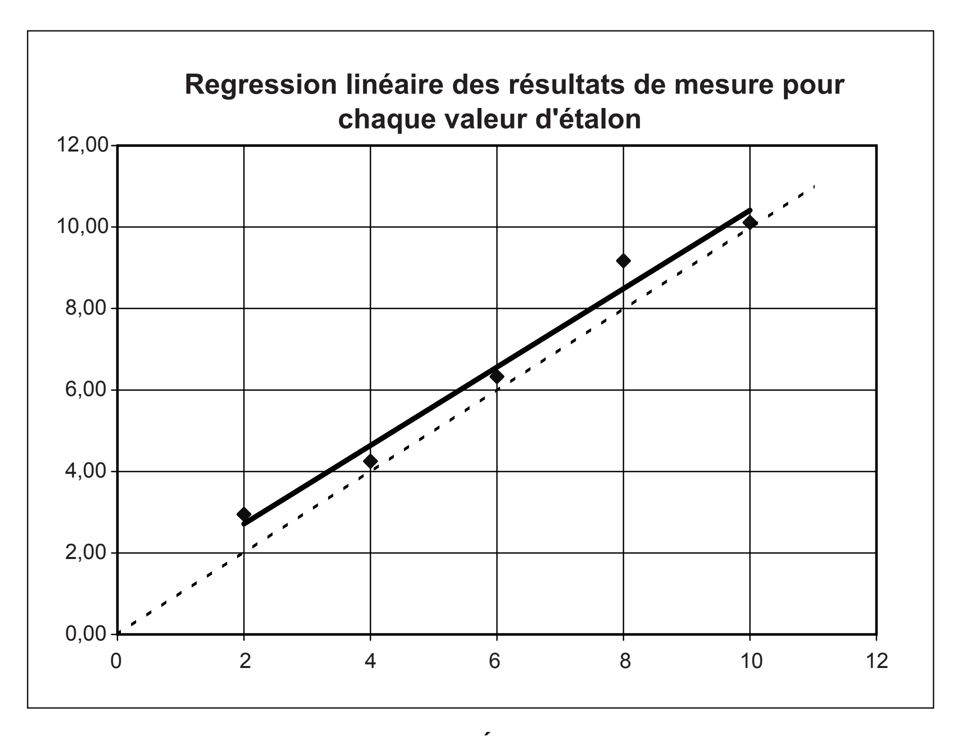


Figure 8.3 Étalonnage

La Figure 8.3 illustre l'erreur de justesse d'un appareil ou plus généralement d'un système de mesure par l'écart entre la droite de régression (dans cet exemple l'hypothèse de linéarité paraît satisfaisante) et la bissectrice qui correspondrait à un système de mesure parfaitement étalonné. Cette figure montre une seule mesure pour chaque valeur d'étalon mais, en réalité, il est possible et même souhaitable de répéter la mesure, un point représentant alors la moyenne des résultats pour une valeur d'étalon.

8.3.3 La fidélité

À l'**erreur aléatoire** correspond le concept de **fidélité** définie par :

> **NF ISO 5725-1-1**
>
> **§ 3.12 Erreur aléatoire**
>
> Étroitesse de l'accord entre les résultats d'essais indépendants obtenus sous des conditions stipulées.

Pratiquement on apprécie la fidélité par la **répétabilité** :

> **NF X 07-001**
>
> **§ 3.6 Répétabilité**
>
> Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure.
>
> Note
>
> Ces conditions sont appelées conditions de répétabilité.
>
> Les conditions de répétabilité comprennent :
>
> – même mode opératoire
> – même observateur
> – même instrument de mesure utilisé dans les mêmes conditions
> – même lieu
> – répétition durant une courte période de temps
>
> Note : La répétabilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

Pratiquement, on mesure la répétabilité par la répétition sur une courte période de la même mesure. La mesure est répétée en repartant à chaque fois de la position initiale. Dans notre exemple de la mesure d'une puissance, on doit débrancher les appareils et refaire à nouveau tous les branchements et éventuels réglages.

La répétabilité peut s'exprimer quantitativement par une caractéristique de dispersion des résultats (variance ou écart type) ou par un intervalle de ± 2 écarts type.

Dans l'évaluation de la justesse, sur le graphique de régression linéaire, la dispersion des résultats autour de la droite peut correspondre à la répétabilité du fait que les mesures ont été effectuées dans des conditions identiques et pendant un temps aussi court que possible.

Nous verrons au paragraphe 7 de ce chapitre la méthode d'estimation statistique de la répétabilité.

8.3.4 La reproductibilité

La notion de répétabilité peut être élargie à celle de reproductibilité :

> **NF X 07-001**
>
> **§ 3.7 Reproductibilité**
>
> Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande[2], mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure
>
> NOTES
>
> Pour qu'une expression de la reproductibilité soit valable, il est nécessaire de spécifier les conditions que l'on fait varier.
>
> Les conditions que l'on fait varier peuvent comprendre :
>
> – principe de mesure
> – méthode de mesure
> – observateur
> – instrument de mesure
> – étalon de référence
> – lieu
> – conditions d'utilisation
> – temps
>
> La reproductibilité peut s'exprimer quantitativement par une caractéristique de dispersion des résultats.
>
> […]

Pratiquement, la reproductibilité inclut les erreurs propres au système de mesure, c'est-à-dire sa répétabilité et la part des autres facteurs de variabilité tels que méthode de mesure, opérateur, instrument de mesure, lieu, conditions d'utilisation, temps, etc.

Pour qu'une expression de la reproductibilité soit valable, il est nécessaire de spécifier les conditions que l'on fait varier.

La reproductibilité peut s'exprimer quantitativement par une caractéristique de dispersion des résultats (variance ou écart type).

Finalement, nous pouvons résumer les définitions dans le Tableau 8.1.

---

2. Le « mesurande » est défini par : grandeur particulière soumise à mesurage. Cette expression est très classique dans le domaine de la mesure.

Tableau 8.1 Définitions des termes liés au système de mesure

Concept	Justesse	Fidélité
Mesure	Écart moyen entre valeur vraie et valeur mesurée	Répétabilité Reproductibilité
Origine	Erreur systématique	Erreur aléatoire
Méthode d'évaluation	Faire la mesure avec des étalons couvrant le domaine de mesure et faire une courbe de régression	Refaire plusieurs fois la même mesure : Répétabilité : dans les mêmes conditions Reproductibilité : dans des conditions variables

8.3.5 La résolution

Il s'agit de « la plus petite différence d'un dispositif afficheur qui peut être perçue de manière significative ». Cet élément peut être une des composantes de la reproductibilité. Il devrait être au moins inférieur à 10 % de la plage d'incertitude.

8.4 Méthodes d'évaluation de type A ou B

On distingue deux méthodes d'évaluation.

8.4.1 Méthodes de type A (statistique)

Il s'agit de toute technique d'évaluation basée sur un procédé statistique prenant en compte la dispersion observée lors de la répétition du procédé de mesure. C'est la méthode que nous avons adoptée précédemment pour la mesure de l'erreur systématique à partir d'une régression, et l'erreur aléatoire en organisant la répétition des mesures.

8.4.2 Méthodes de type B (scientifique)

Il s'agit de toute technique d'évaluation non basée sur un procédé statistique. Une telle évaluation s'appuie généralement sur un jugement scientifique porté à la suite d'une analyse physique de la manipulation, utilisant toutes les informations disponibles. Elles s'appuient sur des éléments tels que notices des fournisseurs d'appareils et constructeurs, certificats d'étalonnage, connaissances théoriques…

Par exemple, la notice du constructeur peut indiquer qu'un appareil de mesure a une incertitude de «x. Un simple calcul traduit cette incertitude par «k x sur le système de mesure incluant cet appareil.

8.4.3 Évaluation globale

Se pose alors le problème de l'évaluation globale lorsque l'on dispose de l'évaluation de différentes causes d'incertitudes par différentes méthodes (de type A ou B). Le principe est décrit à partir de notre exemple de calcul de puissance. Supposons que l'étude de l'incertitude ait mis en évidence uniquement quatre causes d'incertitudes :

– Type A (Statistique : estimation par des écarts types)
  - la répétitivité mesurée par un écart type s = 1,5 watt
– Type B (Scientifique : estimation par des intervalles) :
  - l'influence de la température : $I_t = \pm$ 0,7 watt
  - l'influence de l'ampèremètre : $I_a = \pm$ 0,5 watt
  - l'influence du voltmètre : $I_v = \pm$ 1 watt

Rappelons le principe exposé au paragraphe 2.3 et généralisé pour chacune des causes d'incertitude : chaque intervalle est estimé avec un risque d'erreur et l'on admettra qu'il a 95 % de chance d'inclure la valeur vraie. Chaque intervalle est donc remplacé par un écart type obtenu en divisant par quatre la plage d'incertitude estimée (*Tableau 8.2*).

Tableau 8.2 Exemple d'évaluation globale de l'incertitude

Composante	Type	Évaluation	Écart type	Variance
Répétitivité	A	s = 0,4	0,40	0,16
Température	B	± 0,7 watt	0,35	0,12
Ampèremètre	B	± 0,5 watt	0,25	0,06
Voltmètre	B	± 1 watt	0,5	0,25
Total		± 1,54 watt	0,77	0,59

On fait également l'hypothèse que les causes s'additionnent et sont indépendantes les unes des autres (ceci est souvent le cas, mais on imagine assez bien la grande complexité des évaluations dans le cas contraire). Dans ces hypothèses, la loi de probabilité de la somme est également une loi de Gauss et sa variance

est égale à la somme des variances de chacune des causes. Nous obtenons donc une variance totale de 0,59, soit un écart type de $\sqrt{0,59} = 0,77$ et la plage d'incertitude devient ± 1,54 watt.

À noter que la « résolution » pourrait être intégrée dans ce calcul. Si la résolution est de ± a, l'écart type correspondant est $\frac{a}{\sqrt{3}}$.

8.4.4 Réduction de l'incertitude par la répétition

Si la composante répétitivité s'avérait trop forte, il est possible de la réduire en répétant *n* fois la mesure dans les mêmes conditions ; l'écart type lié à la répétitivité est alors divisé par $\sqrt{n}$.

8.5 Gestion des dispositifs de mesure

La pratique industrielle nécessite parfois beaucoup d'appareils de mesure et de systèmes, parfois des milliers au point que, pour certaines entreprises, la simple identification des appareils est un problème difficile. La gestion peut en être complexe et nécessiter une grande rigueur et des moyens informatiques.

Citons les principaux problèmes à gérer :

- Identifier chaque appareil et sa localisation.
- Avoir un programme d'entretien et d'étalonnage selon une périodicité à définir en fonction des risques de dérive de chacun d'eux. Ceci peut être sous-traité à des entreprises extérieures.
- Identifier chaque système de mesure et les appareils de mesure qui leur sont affectés sachant qu'un appareil peut être utilisé alternativement sur plusieurs systèmes de mesure.
- S'assurer que les systèmes de mesure ont une incertitude compatible avec le besoin. Par exemple, pour une caractéristique d'un produit qui doit être dans une plage de tolérance de ± *x*, l'incertitude doit être en général inférieure à ± *x*/10. Soit les connaissances théoriques permettent de l'affirmer, soit il est nécessaire de faire des mesures d'incertitude.
- Dans certains cas, il est utile, voire nécessaire, de décrire les modes opératoires ou les procédures associées à l'utilisation du système de mesure.

8.6 Mesure et ISO 9001:2008

Tout ce que nous avons présenté donne des moyens d'être en conformité avec la norme ISO 9001 qui, par ailleurs, apporte des compléments sur la rigueur à apporter dans la gestion des mesures.

> **NF EN ISO 9001:2008**
>
> **§ 7.6 Maîtrise des équipements de surveillance et de mesure**
>
> L'organisme doit déterminer les activités de surveillance et de mesure à entreprendre et les équipements de surveillance et de mesure nécessaires pour apporter la preuve de la conformité du produit aux exigences déterminées.
>
> L'organisme doit établir des processus pour assurer que les activités de surveillance et de mesure peuvent être effectuées et sont effectuées de manière cohérente par rapport aux exigences de surveillance et de mesure.
>
> Lorsqu'il est nécessaire d'assurer des résultats valables, les équipements de mesure doivent être
>
> – étalonnés et/ou vérifiés à intervalles spécifiés ou avant leur utilisation, par rapport à des étalons de mesure reliés à des étalons de mesure internationaux ou nationaux (lorsque ces étalons n'existent pas, la référence utilisée pour l'étalonnage doit faire l'objet d'un enregistrement) ;
> – réglés ou réglés de nouveau autant que nécessaire ;
> – identifiés afin de pouvoir déterminer la validité de l'étalonnage ;
> – protégés contre les réglages susceptibles d'invalider le résultat de la mesure ;
> – protégés contre tous dommages et détériorations au cours de leur manutention, maintenance et stockage.
>
> En outre, l'organisme doit évaluer et enregistrer la validité des résultats de mesure antérieurs lorsqu'un équipement se révèle non conforme aux exigences. L'organisme doit entreprendre les actions appropriées sur l'équipement et sur tout produit affecté. Les enregistrements des résultats d'étalonnage et de vérification doivent être conservés.
>
> **NF EN ISO 9001:2008**
>
> **§ 4.1 Exigences générales**
>
> NOTE Il convient que les processus nécessaires au système de management de la qualité décrits ci-dessus comprennent les processus relatifs aux activités de management, à la mise à disposition de ressources, à la réalisation des produits et mesures.

Les normes ISO 9001, 9002 ou 9003 (1987) corrigées en 1994 étaient assez claires quant à la nécessité de s'assurer que les systèmes de mesure avaient une

incertitude suffisante. Bien sûr, cela reste valable avec la version 2008 de la norme qui, cependant, nous paraît moins explicite sur ce point.

> **ISO 9001:1994**
>
> Pour démontrer la conformité d'un produit aux exigences spécifiées, les équipements doivent être utilisés de façon à assurer que l'incertitude de mesure est connue et compatible avec l'aptitude requise en matière de mesurage.

8.7 Incertitude de mesure : méthodes d'estimation et de calcul

8.7.1 Calcul statistique des incertitudes

Nous allons présenter les méthodes de type *A* permettant l'estimation de l'incertitude d'un instrument de mesure ou d'un système de mesure.

Nous nous plaçons dans le cas de produits industriels fabriqués en série.

Ces méthodes sont assez classiques et d'usage courant dans le cadre d'une approche SPC (*Statistical Process Control*).

8.7.2 Méthodologie pour le calcul de la répétabilité

● La répétabilité

Nous rappelons qu'il s'agit de mesurer la dispersion sous forme d'un écart type (ou de la variance)[3] des résultats des « mesurages successifs du même mesurande » (en l'occurrence d'une caractéristique d'un produit fabriqué en série) dans les mêmes conditions (méthode de mesure, observateur, lieu, courte période de temps, etc.).

● Méthodologie

La méthode consiste à :

1- Prendre plusieurs produits de la production : 3 à 10 par exemple. Les choisir, pour la caractéristique considérée, aussi différents que possible. Par exemple,

---

3. L'écart type est une valeur caractérisant la dispersion d'une variable aléatoire ou de résultats expérimentaux. La variance est le carré de l'écart type.

pour trois produits, choisir un produit ayant une valeur faible, un avec une valeur moyenne et le troisième avec une valeur forte. Soit I le nombre de produits. Plus le nombre est grand plus le résultat est précis mais c'est le coût des mesures qui nous conduit à limiter ce nombre.

2- Les faire mesurer dans un laps de temps aussi court que possible par un même opérateur (la mesure inclut la mise en place du produit à mesurer dans le dispositif de mesure).

3- Reprendre les mesures dans un laps de temps aussi court que possible. On mesure ainsi chaque produit un nombre de fois *R* : 3 à 10 fois par exemple. Plus le nombre est grand plus le résultat est précis mais c'est, là encore, le coût des mesures qui nous conduit à limiter ce nombre.

Tableau 8.3 Tableau de mesures

N° de produit	A_1		A_i		A_I
1re mesure	y_{11}	….	y_{i1}	….	y_{I1}
2e mesure	y_{12}	….	y_{i2}	….	y_{I2}
……	….	….	….	….	….
Re mesure	y_{1R}	….	y_{iR}	….	y_{IR}

4- Mesurer la répétabilité. Pour chacun des *I* produits, on calcule la variance des *R* résultats de mesure. Pour le produit n° *i* (*i* allant de 1 à *I*), la variance des *R* résultats est :

$$S_i^2 = \frac{Q_i}{\nu_i} = \frac{\sum_{r=1}^{R}(y_{ir}-\bar{y}_i)^2}{R-1}$$

$\bar{y}_i$ étant la moyenne des *R* mesures du produit A_i

À partir des *I* variances obtenues, la variance mesurant la répétabilité est obtenue par :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{I} Q_i}{\sum_{i=1}^{I} \nu_i}$$ dont la racine carrée donne l'écart type.

Notons que ν_i est une constante égale à $R - 1$, mais nous avons conservé cette façon d'écrire car la formule se généralise au cas où le nombre de mesures serait différent d'un produit à l'autre.

Prenons l'exemple d'une mesure dimensionnelle sur une caractéristique dont la valeur nominale est de 100 μ*m*. Nous avons obtenu les résultats suivants pour 3 mesures sur respectivement 4 produits.

Tableau 8.4 Calculs

	A_1	A_2	A_3	A_4	
	99,5	100,4	102,0	104,8	
	98,9	102,7	103,3	103,8	
	103,1	103,5	104,5	107,6	Totaux
Q_i	10,32	5,18	3,13	7,76	26,39
ν_i	2	2	2	2	8
S_i^2	5,16	2,59	1,56	3,88	

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{I} Q_i}{\sum_{i=1}^{I} \nu_i} = \frac{26,39}{8} = 3,30$$

et l'écart type $S = 1,82\ \mu m$.

Ce qui nous donne une plage d'incertitude de ± 3,64 μm (± 2 × S).

8.7.3 Méthodologie pour le calcul de la reproductibilité

- **La reproductibilité**

Nous rappelons qu'il s'agit de mesurer la dispersion sous forme d'un écart type des résultats des « mesurages du même mesurande » (en l'occurrence d'une caractéristique d'un produit fabriqué en série) en faisant varier les conditions (méthode de mesure, observateur, lieu, courte période de temps…).

- **Méthodologie pour le calcul de la reproductibilité**

La méthode consiste à :

1- Prendre, comme pour la répétabilité, plusieurs produits de valeurs aussi différentes que possible (3 à 10 par exemple). Plus le nombre est grand plus le résultat est précis mais c'est le coût des mesures qui nous conduit à limiter ce nombre.

2- Rechercher les facteurs susceptibles de nuire à la reproductibilité. Ces facteurs peuvent être extrêmement nombreux mais l'expérience montre que l'on peut le plus souvent les ramener à trois :

– l'influence de l'opérateur dans le cas où ils seraient plusieurs ;

– l'influence du système de mesure dans le cas où il y en aurait plusieurs ;

– le temps (le moment où est réalisée la mesure). Cela peut étonner mais, en pratique, la plupart des autres facteurs évoluent dans le temps : température, hygrométrie, dérive de l'appareil, etc. En faisant des mesures à des dates différentes aussi éloignées que possible on a tendance à intégrer tous ces facteurs contribuant à la non-reproductibilité.

3- Choisir le facteur majeur

Une réflexion sur le dispositif de mesure nous conduit en général à identifier le facteur prépondérant et par souci de simplification on se limitera à celui-ci en considérant les autres comme négligeables.

Les A_i représentent les produits numérotés de 1 à I. On prendra 3 à 10 modalités (on dit aussi niveau) du facteur « produit » A.

Les B_i représentent les modalités du facteur retenu, ces modalités étant numérotées de 1 à J. On prendra 3 à 10 modalités du facteur B. Là encore le choix du nombre de produits et de modalités du facteur choisi est un compromis entre le coût des mesures et la préc ision recherchée.

4- Organiser un plan selon le Tableau 8.5. La série de mesures sur les I produits est reprise en répétant les mesures R fois dans un laps de temps très court. R sera au moins égal à 2.

5- Mesurer la répétabilité et la reproductibilité à partir du tableau d'analyse de la variance à deux dimensions : la variance résiduelle mesure la répétabilité.

Tableau 8.5 Tableau de mesures (reproductibilité)

	A_1		A_i		A_I
B_1	y_{111} ….. y_{11R}		y_{i11} …. y_{i1R}		y_{I11} …. y_{I1R}
B_j	y_{1j1} …. y_{1jR}		y_{ij1} …. y_{ijR}		y_{Ij1} …. y_{IjR}
B_J	y_{1J1} …. y_{1JR}		y_{iJ1} …. y_{iJR}		y_{IJ1} …. y_{IJR}

Tableau 8.6 Analyse de la Variance pour le calcul de la reproductibilité

Origine	Somme des carrés	ddl[4]	Carré moyen	F de Snedecor	Variances « reproductibilité »
Facteur A	$Q_a = RJ\,\Sigma\, a_i^2$	I – 1	$S_a^2 = Q_a/(I-1)$	$F = S_a^2/S_r^2$	$V_a = (S_a^2 - S_r^2)/JR$
Facteur B	$Q_b = RI\,\Sigma\, b_j^2$	J – 1	$S_b^2 = Q_b/(J-1)$	$F = S_b^2/S_r^2$	$V_b = (S_b^2 - S_r^2)/IR$
Interaction AB	$Q_{ab} = R\,\Sigma\,(a_ib_i)^2$	(J – 1) (I – 1)	$S_{ab}^2 = Q_{ab}/(J-1)(I-1)$	$F = S_{ab}^2/S_r^2$	$V_{ab} = (S_{ab}^2 - S_r^2)/R$
Résiduelle	$Q_r = \Sigma_{ijr}y_{ijr}^2 - \Sigma_{ij}\,(\Sigma_r y_{ijr})^2/R$	IJ (R – 1)	$S_r^2 = Q_r/IJ\,(R-1)$		S_r^2
Total	$Q_t = \Sigma_{ijr}\,y_{ijr}^2 - (\Sigma_{ijr}\,y_{ijr})^2/N$	N – 1	$S_t^2 = Q_t/(N-1)$		

– **Calcul de Q_r** : cette formule est un peu compliquée à calculer. En pratique on obtient le résultat d'une façon très simple en partant de la propriété d'un tableau d'analyse de la variance : $Q_t = Q_a + Q_b + Q_{ab} + Q_r$ (cette propriété d'addition des sommes quadratiques est également valable pour les ddl comme on peut le vérifier aisément sur le Tableau 8.6.

– **Calcul de S_t^2** : il s'agit du calcul de la variance de l'ensemble des données.

– **Calcul des a_i b_j a_ib_j :**

On calcule d'abord *m* la moyenne générale de toutes les valeurs *y*.

– a_i = (moyenne de toutes les valeurs y correspondant à la modalité *i* de *A*) – *m*

– b_j = (moyenne de toutes les valeurs y correspondant à la modalité *j* de *B*) – *m*

– a_ib_j = (moyenne de tous les y correspondant à un couple A_iB_j) – a_i – b_j – *m*

6- Interpréter les résultats.

Considérons les variances calculées dans la colonne de droite du tableau :

– V_a mesure la dispersion entre les I produits. Celle-ci est calculée pour mémoire mais ne sert pas directement au calcul de la reproductibilité.

4. ddl : degré de liberté, autrement dit le nombre d'informations indépendantes utilisées pour le calcul de la somme des carrés

– $V_b + V_{ab}$ correspond à la part de variation liée au facteur *A* et à l'interaction entre le produit (*A*) et les conditions de mesure prises en compte (*B*). Cette interaction est parfois difficile à interpréter physiquement. Il s'agit de l'effet propre à l'association entre le produit et les conditions de mesure.
– S_r^2 correspond à la répétabilité
– $V_b + V_{ab} + S_r^2$ correspond à la reproductibilité

7- S'assurer, grâce au test F de Snedecor de la signification statistique des facteurs.

Exemple de calcul de reproductibilité

Considérons un système de mesure destiné à mesurer l'épaisseur d'un dépôt sur un support métallique. Cet appareil est utilisé par plusieurs opérateurs différents.

1- La mesure coûte cher et nous décidons de faire l'étude sur seulement 3 produits.

2- Une analyse préalable nous amène à la conclusion que l'opérateur ne peut pas avoir d'influence notable sur le résultat mais, en revanche, que le système pourrait être sensible à des conditions atmosphériques et pourrait évoluer dans le temps. Il est donc décidé de faire les mesures par un même opérateur une fois par semaine sur 4 semaines. Les mesures seront répétées 2 fois dans un temps très court. ($R = 2$)

Nous nommons *A* le produit, *B* la date. Nous avons obtenu les résultats suivants exprimés en µ *m* :

Tableau 8.7 Tableau de mesures expérimentales (reproductibilité)

	A_1	A_2	A_3
B_1	12,3 11,8	11,5 11,4	9,4 10,6
B_2	14,5 14,0	11,5 12,0	10,7 10,5
B_3	12,1 12,3	12,1 11,8	10,3 10,4
B_4	11,9 12,2	11,5 11,2	10,1 10,7

3- Mesure de la répétabilité et la reproductibilité à partir du tableau d'analyse de la variance à deux dimensions :

– $m = 11{,}53$
– $a_i : a_1 = 1{,}104 \quad a_2 = 0{,}092 \quad a_3 = -1{,}196$
– $b_j : b_1 = -0{,}367 \quad b_2 = 0{,}667 \quad b_3 = -0{,}033 \quad b_4 = -0{,}267$
– a_ib_i = les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8.8 Calcul des interactions

	A_1	A_2	A_3
B_1	– 0,221	0,192	0,029
B_2	0,946	– 0,542	– 0,404
B_3	– 0,404	0,358	0,046
B_4	– 0,321	– 0,008	0,329

Tableau 8.9 Analyse de la variance

Origine	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F de Snedecor	Variances
Facteur *A*	21,261	2	10,63	87,4	1,31
Facteur *B*	3,907	3	1,30	10,7	0,20
Interaction *AB*	3,886	6	0,65	5,3	0,26
Résiduelle	1,460	12	0,12		0,12
Total	30,514	23	1,33		

4- Interprétation des résultats

Considérons les variances calculées dans la colonne de droite du tableau :

– V_a mesure la dispersion entre les *I* produits. Celle-ci est calculée pour mémoire mais ne sert pas au calcul de la reproductibilité.
– $V_b + V_{ab}$ correspond à la part de variation liée au facteur *A* et à l'interaction avec le produit.
– La variance résiduelle Sr^2 mesure la répétabilité.

– $V_b + V_{ab} + Sr^2$ correspond à la reproductibilité. Il faut bien noter que la répétabilité est une des composantes de la reproductibilité.

5- Le test *F* de Snedecor permet de s'assurer de la signification statistique des facteurs. Si l'on confronte le F de Snedecor calculé par rapport aux valeurs données par la table au seuil de confiance de 95 % on obtient :

Tableau 8.10 Test de Snedecor

Origine	ddl	F calculé	F de la table (seuil 95 %)
Facteur *A*	2, 12	87,4	3,89
Facteur *B*	3, 12	10,7	3,49
Interaction *AB*	6, 12	5,3	3,00

Donc tout est statistiquement significatif puisque les résultats expérimentaux sont supérieurs à ceux de la table. Dans le cas d'un résultat non significatif on remplace la variance par 0.

Là encore la signification statistique du facteur *A* (produit) est donnée pour mémoire. On notera cependant que si la variance liée à *A* n'était pas significative cela signifierait que le système de mesure n'est pas assez fidèle (« précis ») pour permettre de différencier les valeurs des 3 produits.

En conclusion nous obtenons :

Répétabilité : Variance = 0,12 écart type = 0,35 μm

Reproductibilité : Variance = 0,58 écart type = 0,76 μm

Soit une plage d'incertitude de $\pm 2 \times 0{,}76 = 1{,}52\ \mu m$

Si cette valeur est trop forte pour l'usage prévu du système de mesure nous disposons maintenant d'une valorisation des sources de non-reproductibilité, mais reste à faire un travail d'analyse physique sur les causes fondamentales pour pouvoir améliorer le système de mesure.

● Calcul de la reproductibilité avec plusieurs facteurs

Il est possible d'organiser un plan de mesures en intégrant plusieurs facteurs de reproductibilité mais il faut savoir que la complexité du plan sera fortement

accrue. Par contre cela permet d'apprécier la part de chaque facteur et donc de mieux déterminer les axes d'amélioration.

Pour deux facteurs de reproductibilité on peut utiliser une analyse de la variance à trois facteurs ; au-delà on rentre dans des techniques de plans d'expériences pour lesquels le nombre de facteurs n'est pas limité. Dans ce cas les formules présentées dans le cas d'un facteur se généralisent mais nous n'abordons pas ce cas ici, sachant que ce type d'étude est très cher et est rarement nécessaire.

8.7.4 Méthodologie pour le calcul de la justesse

● La justesse

La méthode consiste à mesurer l'écart entre les valeurs obtenues à partir d'une série de résultats d'essai et une valeur de référence acceptée qui peut être un étalon. Pratiquement, on l'obtient à partir de plusieurs mesures correspondant à des étalons de valeurs différentes couvrant l'étendue du champ de mesure du système ou de l'appareil de mesure.

On utilise alors un calcul de régression pour chercher la meilleure droite ou courbe passant à travers les résultats expérimentaux.

● Méthodologie pour le calcul de la justesse

La méthode consiste à :

1- Prendre plusieurs valeurs de référence différentes (ou des étalons) pour couvrir la plage normale d'utilisation.

2- Pour chaque étalon, faire plusieurs fois la mesure dans un temps réduit comme pour une répétabilité. Il n'est pas indispensable que le nombre de résultats soit le même pour chaque valeur de référence.

Il est souhaitable de disposer, en tout, de l'ordre de 10 à 50 mesures, ce nombre étant fonction du coût des mesures. En cas de mesures très coûteuses, il est acceptable de ne faire qu'une mesure par valeur d'étalon.

3- On calcule la droite de régression.

4- On apprécie l'erreur de justesse sur la plage de mesure en comparant la droite de régression à la bissectrice. Il se peut que l'on obtienne un meilleur ajustement avec une courbe plutôt qu'une droite. Pour cela, une régression polynomiale sera, en général, la solution.

Nous ne donnons pas ici les formules, ce type de calcul étant disponible sur Excel.

Exemple de calcul de justesse et répétabilité

Considérons à nouveau notre système de mesure destiné à mesurer l'épaisseur d'un dépôt sur un support métallique. Nous disposons de plusieurs échantillons dont l'épaisseur est connue par un procédé beaucoup plus précis mais nécessitant une mise en œuvre très chère. Ces échantillons sont reconnus comme une référence acceptée par les spécialistes.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

X	2	2	4	4	4	6	6	8	8	10
Y	2,95	2,5	4,32	4,07	4,78	6,33	6,74	8,7	9,17	10,11

X étant la valeur de référence, *Y* la valeur mesurée.

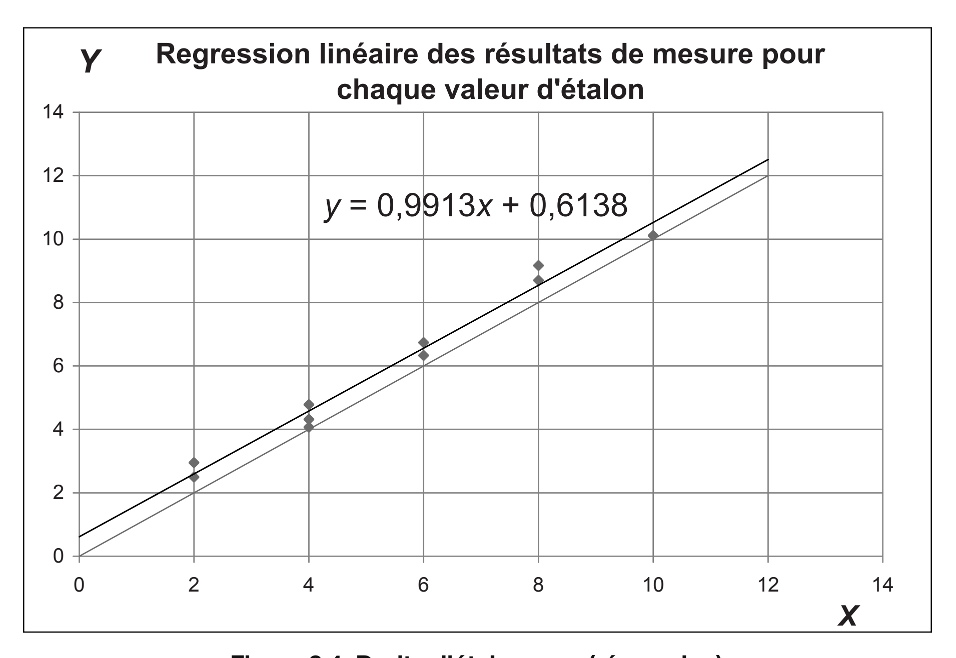


Figure 8.4 Droite d'étalonnage (régression)

Le graphique 8.4 montre la droite de régression (droite des moindres carrés)[5] c'est-à-dire celle qui ajuste le mieux les points expérimentaux.

5. Cette droite est celle pour laquelle la somme des carrés de la différence entre la valeur mesurée et celle de la droite pour chaque valeur de référence est minimum.

Nous obtenons, à partir des calculs classiques de régression, les résultats suivants :

– Équation de la droite : $Y = 0{,}991\, X + 0{,}614$ µ*m* ;

– Écart type résiduel : $Sr = 0{,}38$ µ*m* ;

– Variance résiduelle : $Sr^2 = 0{,}15$.

Cet écart type mesure la répétabilité.

Pratiquement, si l'on obtient, par exemple, un résultat expérimental $Y = 6{,}30$ µ*m*, par la formule, on calcule la valeur « juste » : $X = 5{,}74$ µ*m* à laquelle on associe une plage d'incertitude : ± 2 × 0,38 = 0,76 µ*m*.

En toute rigueur, on devrait prendre en compte, dans la plage d'incertitude, l'imprécision obtenue sur la valeur $X = 5{,}74$ µ *m* du fait que la droite de régression est obtenue à partir d'un nombre limité de valeurs. Celle-ci se calcule pour une valeur particulière X_0 de X à partir de la variance suivante :

$$S^2 = S_r^2 \times \left[\frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \overline{X})^2}{\sum_i (X_i - \overline{X})^2} \right]$$

Avec :

– $Sr^2 = 0{,}15$ variance résiduelle (répétabilité) ;

– $n = 10$ le nombre de mesures expérimentales pour calculer la justesse.

Pour $X = 5{,}74$ µ*m*, nous obtenons : $S^2 = 0{,}015$ que l'on ajoute à la variance résiduelle soit au total 0,165 au lieu de 0,15. On voit l'importance du nombre de mesures *n* sur la précision du résultat.

Partie IV

L’amélioration des produits et ses méthodes et techniques

9

Les aspects économiques de la qualité

9.1 Réflexions sur l'économie de la qualité

Nous allons examiner les différents aspects de l'économie de la qualité en montrant son évolution et ses perspectives puis, dans un deuxième temps, nous examinerons les aspects méthodologiques.

9.1.1 Les coûts de non-qualité

L'économie de la qualité évoque traditionnellement l'idée de coûts de non-qualité avec notamment l'expression des COQ : Coûts d'obtention de la qualité.

Ce domaine est d'autant mieux étudié qu'il existe une norme AFNOR à ce sujet (NF X 50-126 : Gestion de la qualité – Guide d'évaluation des coûts résultant de la non-qualité). Cette méthode a également figuré dans l'ISO 9004.

La méthode consiste à faire une évaluation de l'ensemble des coûts que l'entreprise subit par le non-respect des spécifications à tous les stades du cycle de vie du produit ou service, donc aussi bien en interne que chez le client. Cela couvre tous les dysfonctionnements, défauts, non-conformités... en un mot :

« Tout travail non bien fait du premier coup. »

L'expérience montre que ces coûts atteignent couramment 2 % à 5 % du chiffre d'affaire, et nous l'avons même constaté dans des domaines de produits très complexes, atteignent des niveaux de 30 %. Les enjeux peuvent donc être énormes pour l'entreprise. Nous verrons ultérieurement plus en détail cette méthode qui nous paraît critiquable sur certains points.

L'intérêt porté à cette méthode correspond à une orientation donnée à la qualité qui est celle du respect des spécifications et du « zéro défaut ». L'entreprise gagne sur deux plans : elle réduit ses coûts internes et elle réduit les insatisfactions des clients.

Cette approche ne suffit pas. Il faut lui associer une recherche de la satisfaction en répondant mieux à ses attentes, nous dirons, en simplifiant quelque peu le langage, en recherchant le « bon » niveau de « performances » du produit ou service. Par exemple, quel est le niveau de confort d'une voiture attendu par le client. On n'est plus dans la problématique de respect des spécifications mais celle du choix du bon niveau de celles-ci.

9.1.2 Le rapport qualité/prix

Le succès d'une entreprise dépend essentiellement du choix du produit ou du service qu'elle se propose de vendre, et ceci en relation avec son prix, autrement dit, du choix du rapport qualité/prix optimal en accord avec les spécificités de l'entreprise.

Ce sujet est au cœur même de la vie de l'entreprise et fait intervenir de nombreux éléments tels que : politique de l'entreprise, savoir-faire, contexte économique, environnement, aspects sociaux, etc.

Des méthodes ont été élaborées avec succès pour traiter de ce problème. Notamment l'analyse de la valeur et l'analyse fonctionnelle contribuent à atteindre cet objectif. Ces méthodes, bien qu'anciennes, sont sans doute insuffisamment utilisées actuellement mais nous constatons un regain d'intérêt très fort pour elles actuellement. En résumé, « l'analyse fonctionnelle » aide à la définition les fonctions du produit attendues par le client et « l'analyse de la valeur » permet de réduire le coût correspondant à chaque fonction et d'optimiser la « valeur » de chaque fonction, c'est-à-dire son rapport satisfaction du besoin/coût.[1]

Nous étudions cette méthode au chapitre 13.

---

1. La norme NF X 50-150 donne la définition de la valeur suivante : « Jugement porté sur le produit sur la base des attentes et des motivations de l'utilisateur, exprimé par une grandeur qui croît lorsque, toute chose égale par ailleurs, la satisfaction du besoin de l'utilisateur augmente et/ou que la dépense afférente au produit diminue. »

9.1.3 La recherche des attentes du client et la concurrence

On découvre cependant de plus en plus que les attentes des clients n'ont pas une signification dans l'absolu. Le client est sensible à une qualité supérieure offerte par la concurrence même si cela va au-delà de ses attentes initiales. On pourrait croire qu'un client satisfait par un produit venant d'un fournisseur restera fidèle à celui-ci. En fait, on constate de plus en plus qu'il peut partir à la concurrence s'il découvre des performances meilleures même si cela va au-delà de ses attentes et parfois en consentant à y mettre un prix un peu plus élevé. Dans le contexte de concurrence actuel, cela revient à dire que l'entreprise doit rechercher systématiquement à améliorer les « performances » de ses produits tout en limitant les coûts au maximum. Il fau t donc que la « valeur » (au sens de l'analyse de la valeur) perçue soit au moins égale à celle des concurrents.

Cette idée peut choquer car elle va à l'encontre de l'idée du meilleur rapport qualité/prix couramment admise.

9.1.4 Le coût de la qualité

Cela amène à se poser la question : la qualité coûte-t-elle cher ?

- **L'amélioration des performances**

Il est clair que, toutes choses égales par ailleurs, un accroissement des performances entraîne généralement une augmentation du coût. Rendre une voiture plus confortable, plus silencieuse se traduit très certainement par un prix de revient plus cher.

Ajouter un GPS au tableau de bord coûte nécessairement.

Cela peut ne pas être vrai si cette amélioration est obtenue par l'emploi d'une nouvelle technologie.

Par exemple l'introduction de l'électronique dans une machine à laver va permettre de réduire les coûts en simplifiant la mécanique et de proposer de nouvelles fonctions plus ou moins attendues par les clients.

● **La réduction des non-conformités**

Mais la réduction des non-conformités s'accompagne en général d'une réduction du coût du produit. C'est-à-dire que les efforts faits pour supprimer les non-conformités sont largement compensés par la réduction de ces coûts.

On peut également se demander s'il y a un niveau pour la proportion de non-conformités qui donne un coût minimum. Autrement dit, existe-t-il un optimum économique de la proportion de non-conformités ? Théoriquement on pourrait le penser ; mais notre expérience nous a toujours montré que l'amélioration systématique de la proportion de non-conformités s'accompagne toujours d'une réduction des coûts. Ce qui justifie des conceptions telles que : « La démarche ppm »[2] ou « le zéro défaut » qui sont orientées vers l'« amélioration permanente ou continue » en terme de réduction des non-conformités.

La voie est donc de rechercher des améliorations de performance des produits en mettant l'accent sur l'innovation tout en recherchant la réduction des coûts par les gains de productivité et par la réduction des coûts de non-conformités. En pratique, les deux approches demandent des investissements et le seul frein est leur nécessaire limitation. La bonne gestion de ces améliorations se traduit finalement par l'établissement des priorités, ce qui suppose une bonne connaissance des données relatives à la qualité et aux coûts.

Le schéma suivant (*Figure 9.1*) illustre le problème de la relation qualité prix en mettant en évidence les différents aspects de la qualité et les différents éléments du prix d'un produit. Il montre que la recherche du bon niveau des spécifications est un équilibre à trouver avec le prix et qu'en tout état de cause les non-conformités représentent une charge à réduire autant que possible.

9.1.5 La satisfaction et l'insatisfaction des clients

Nous avons associé l'idée d'amélioration des performances à la satisfaction des clients, et celles de réduction des non-conformités à celle d'insatisfaction. Nous rejoignons là les études du sociologue américain Hertzberg[3] qui avait montré que l'insatisfaction n'était pas le contraire de la satisfaction.

On est satisfait de la couleur de sa voiture et insatisfait d'une panne.

---

2. Cette démarche consiste à adopter tant en production qu'avec les fournisseurs une politique systématique et organisée de réduction des défauts constatés pour atteindre des taux de défauts si bas que l'on préfère les exprimer en « parties par million » plutôt qu'en « pour cent ».
3. Herzberg est surtout connu pour son analyse des motivations en collaboration avec Maslow. Leur « pyramide des motivations » reste toujours d'actualité.

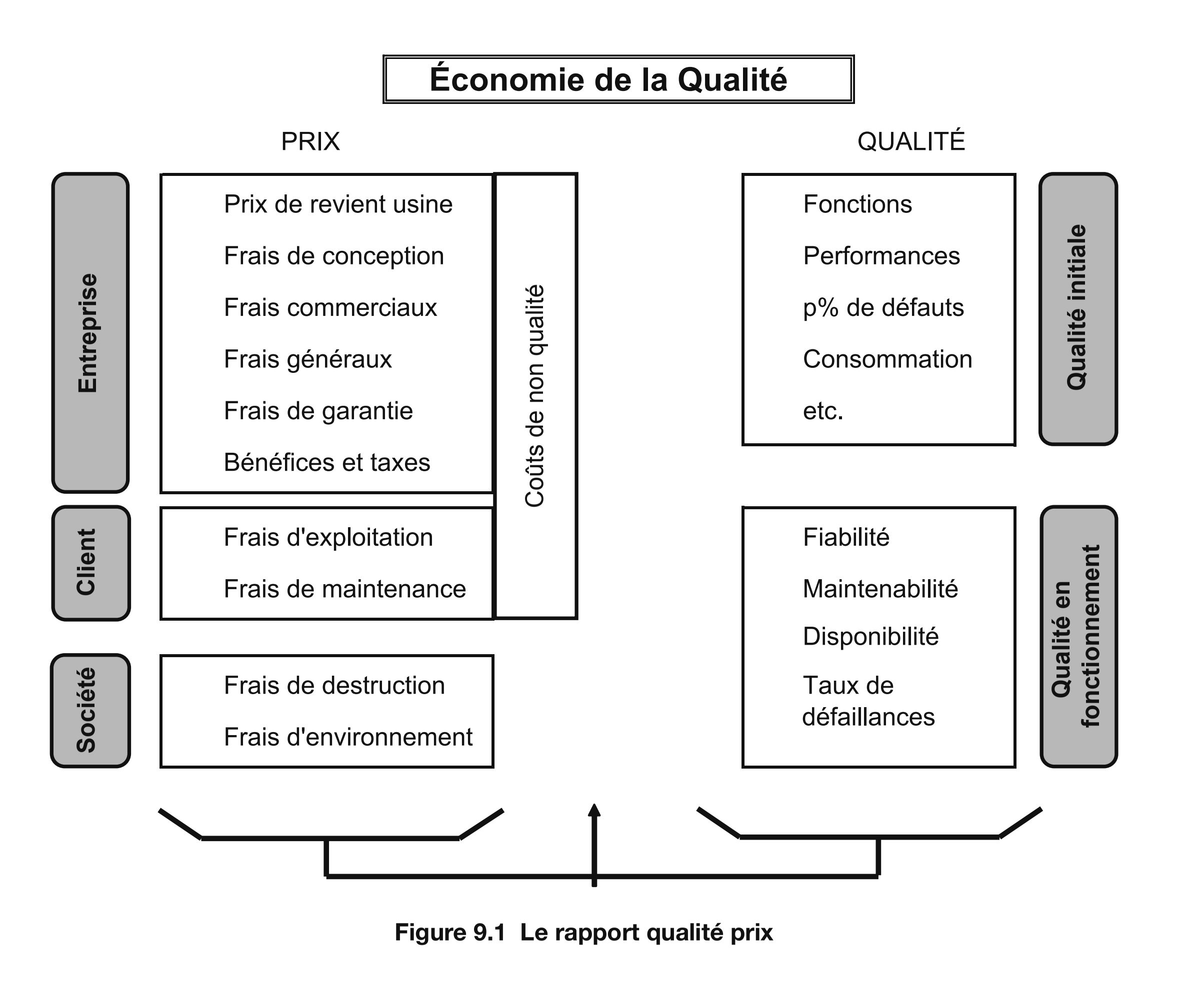


Figure 9.1 Le rapport qualité prix

Cette idée nous paraît importante quand il s'agit d'analyser les attentes des clients et d'étudier leur appréciation portée sur les produits en veillant à bien prendre en compte ces deux aspects complémentaires.

9.2 Méthodes de l'économie de la qualité

Nous classons ces différentes méthodes en deux catégories :

– celles dont l'objectif est l'analyse et l'amélioration de la relation qualité/coûts. Elles sont orientées vers la satisfaction du client ;
– celles dont l'objectif est la réduction des coûts et l'optimisation des actions dans ce domaine. Elles sont orientées vers la réduction des insatisfactions du client et la réduction des coûts « inutiles » supportés par l'entreprise.

9.3 Méthodes orientées sur l'analyse et amélioration de la relation qualité/coûts

9.3.1 Analyse de la concurrence sur les plans qualité et coûts

Il s'agit de comparer d'une façon systématique les produits de l'entreprise à ceux de la concurrence sur les plans qualité et prix. Ceci peut se faire selon le Tableau 9.1.

Tableau 9.1 Analyse de la concurrence sur les plans qualité et coût

Qualité	Coût global
Esthétique	Prix de vente
Performances	
Taux de défauts	Coût de maintenance
Fiabilité	
Qualité de service	Coût d'utilisation

L'objectif d'une telle analyse est de tirer les leçons pour les développements à venir.

Pour la qualité initiale du produit, une simple analyse des produits concurrents permet de faire les comparaisons.

La difficulté est de trouver les informations à l'utilisation. Cela peut être difficile pour sa propre entreprise mais surtout pour les produits concurrents. Selon la

nature des produits, on peut trouver de telles informations, à titre d'exemple, auprès des :

– services achats des clients ;
– entreprises spécialisées dans la maintenance ou la réparation ;
– revues de consommateurs qui publient des analyses comparatives.

Dans les deux premiers cas, seul le rang auquel se situe l'entreprise par rapport aux concurrents peut être fourni afin de ne pas dévoiler d'informations confidentielles.

N'oublions pas que la norme ISO 9001:2008 exige d'analyser la satisfaction des clients. Une telle méthode se situe parfaitement dans ce contexte.

9.3.2 Analyse fonctionnelle et analyse de la valeur

Ces méthodes permettent d'optimiser le « rapport qualité/prix ». Leur objectif est d'optimiser la conception des produits dans le sens de la satisfaction des clients. Nous traitons de ce sujet en détail au chapitre 13. Nous nous limitons ici à en résumer les principes et l'intérêt.

Ces méthodes nous paraissent des plus intéressantes. Elle consiste, à partir d'une analyse des besoins des clients, à mettre en rapport :

– d'une part, les fonctions attendues du produit que l'on se propose de concevoir et leur importance pour le client ;
– et, d'autre part, le coût d'obtention de chacune de ces fonctions.

On s'efforce de rendre aussi cohérente que possible cette relation, par exemple en recherchant des solutions d'autant moins coûteuses que les fonctions sont peu importantes et, à la limite, en les éliminant si elles restent trop chères. L'analyse des fonctions se fait par « l'analyse fonctionnelle » qui aboutit elle-même au « cahier des charges fonctionnel » du produit. L'analyse de la valeur permettra entre autres d'établir le tableau schématique ci-dessous (*Tableau 9.2*) qui illustre la mise en parallèle du coût d'une fonction avec son poids, c'est-à-dire son importance pour le client.

Le coût du produit est réparti entre le coût de ses différents constituants et celui des différents coûts de production. Ensuite, ces coûts sont répartis par fonction selon leur contribution. La seule difficulté tient au fait que certains composants ou opérations de production peuvent concerner plusieurs fonctions. Il faut alors les répartir en fonction de l'importance de la contribution, ce qui ne pose en général pas de difficulté majeure.

Tableau 9.2 Comparaison coût/importance d'une fonction

Fonctions	Poids	Composants			Procédé		Coût de la fonction
		1	2	3	4	5	
A	5			15	9		24
B	2	3				28	31
C	3		6		2		8
D	2	7			5		12
E	1		20			5	25
Coûts		10	26	15	16	33	100

Ce tableau sera un support de travail pour chercher les solutions optimum en termes de fonctions ou de solutions techniques.

9.3.3 Calcul de la rentabilité d'un investissement qualité

Une opération visant à améliorer la qualité doit être considérée comme un investissement normal et peut donc faire l'objet d'un calcul de rentabilité. La prise de décision doit se faire en s'assurant que les gains permettront de rembourser les frais dans un délai suffisamment court et apporter un profit par la suite. La Figure 9.2 montre trois points : le temps et le coût nécessaires à la mise en place de l'investissement, le temps nécessaire à la récupération des sommes investies (point zéro) et le profit réalisé par la suite.

Voici quelques exemples :

- achat d'un équipement de contrôle qui doit contribuer à la réduction des non-conformités ;
- lancement d'une opération de formation à l'AMDEC (Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leur criticité) qui permettra de réduire les défaillances des produits en clientèle ;
- la mise en place d'un système informatique pour saisir et traiter les non-conformités constatées sur les produits en production ou en service après-vente.

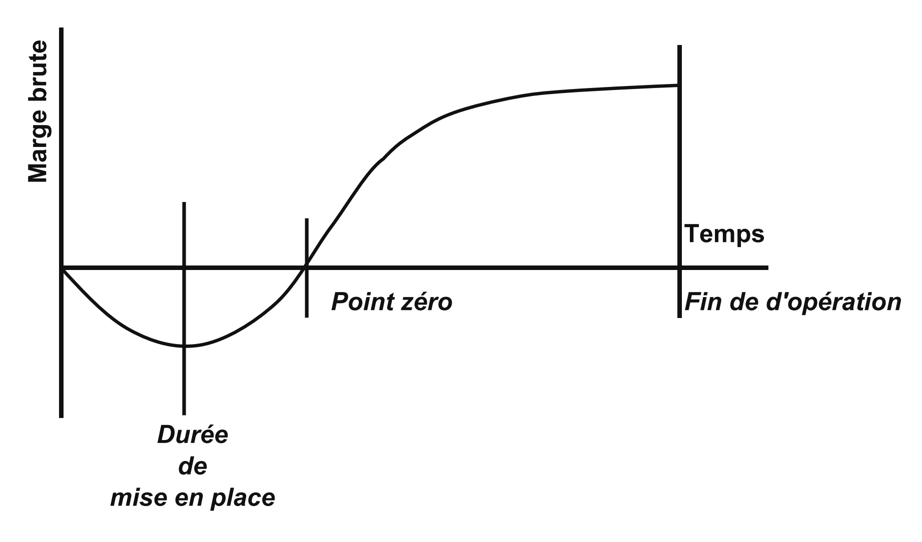


Figure 9.2 Rentabilité d'un investissement qualité

9.3.4 Coût du cycle de vie ou coût global

Ce sujet sera étudié plus en détail au cours du chapitre 6 sur la Sûreté de Fonctionnement. Nous nous limitons ici à en résumer les principes et l'intérêt.

Il s'agit d'une méthode consistant à calculer, dès la conception, l'ensemble des coûts que le client devra supporter durant toute la vie du produit et ceci afin d'en optimiser le total que l'on appelle le coût global ou le coût de possession. Nous en donnons une description plus détaillée dans le chapitre sur la « sûreté de fonctionnement ».

Ces coûts se décomposent ainsi :

– le coût d'acquisition (prix de vente) couvrant les éléments suivants : conception, industrialisation, production, installation, frais commerciaux, frais généraux, taxes et impôts, marges, etc.

– le coût d'utilisation couvrant : consommation en carburant, énergie, assurance, taxes, maintenance (réparations, entretien, modifications…), etc.

– le coût de destruction ou de fin de vie ;

– le coût écologique : répercussions éventuelles sur le plan écologique du fait de la fabrication ou de l'utilisation du produit.

Nous résumons ces coûts en :

– coût d’acquisition ;
– coût d’exploitation.

L’objectif est donc d’en optimiser le total sachant que, en général, une amélioration de la fiabilité ou une réduction des consommations se traduisent par un accroissement du coût d’acquisition (*Figure 9.3*).

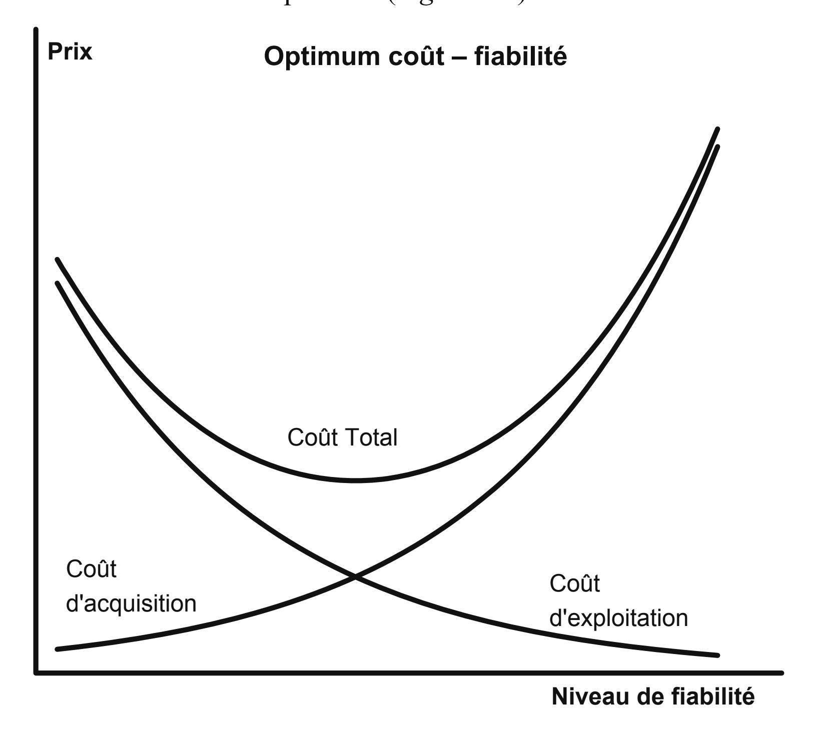


Figure 9.3 Optimum coût-fiabilité

On peut faire un même graphique pour la consommation.

L’expérience montre que les coûts supportés par le client peuvent atteindre plusieurs fois le prix d’acquisition, l’enjeu est donc d’importance.

De plus en plus, ce coût global fait partie du contrat pour les grands projets.

Cette méthode exige de rassembler beaucoup de données :

– données industrielles (main-d’œuvre, taux, matières, frais…) ;
– données en clientèle : taux de défaillance, durée de vie, coût de réparation, entretien, consommation, etc.

Ces données étant prévisionnelles, cela suppose souvent de faire des modélisations à partir de données recueillies précédemment ou d'établir des modèles théoriques.

Ce coût est calculé au cours de la conception du produit, et doit faire évoluer celle-ci en apportant les corrections nécessaires.

L'optimisation du coût global est d'autant plus intéressante que l'on peut associer le client à ce calcul. En effet, actuellement, les clients sont peu avertis des coûts d'exploitation et encore trop souvent sensibles essentiellement au prix d'achat.

9.3.5 Conception à coût objectif

L'objectif de la conception à coût objectif (CCO) ou *Design To Cost* (DTC) est de concevoir le produit en respectant un objectif de coût unitaire de production. Elle est décrite dans la norme AFNOR NF X 50-156 : Management par la Valeur – Conception à Objectif désigné ou à Coût Objectif.

Elle consiste en la gestion d'un programme permettant de guider la conception d'un produit nouveau afin de satisfaire au mieux les objectifs de coût de production, de délai et de performances.

Elle nécessite la mise en œuvre de procédures particulières liées à la conduite de projets.

9.3.6 Conception à coût global

Il s'agit de la même méthode que la CCO, mais en y intégrant le coût global. Elle s'inspire donc fortement des principes du « coût du cycle de vie ».

Ces méthodes sont appliquées essentiellement pour les gros projets. Elles trouvent leur application dans les cas où le prix de vente est plafonné.

9.4 Méthodes orientées sur la « réduction des coûts et l'optimisation des actions »

9.4.1 Principe

Elles sont orientées vers la réduction des insatisfactions du client et la réduction des coûts.

9.4.2 Calcul et réduction des coûts de non-qualité

● Méthode

On se réfère à la norme X 50-126 (« Gestion de la qualité – Guide d'évaluation des coûts résultant de la non-qualité »).

Il est traditionnel d'employer dans ce cadre les expressions :

- coûts de la non-qualité (nous paraît la mieux adaptée) ;
- coûts de non-conformité (fait référence à une spécification) ;
- coûts résultants de la non-qualité (expression utilisée dans la norme X 50-126) ;
- coûts de la qualité ;
- coûts d'obtention de la qualité (COQ) (très utilisé actuellement).

Ces deux dernières expressions nous paraissent tout à fait inacceptables. Elles réduisent la qualité à la diminution des non-qualités. Nous avons suffisamment insisté sur le fait que cela n'était qu'un volet de la qualité.

● Différentes catégories de coûts

On distingue les différentes catégories :

- anomalies internes ;
- anomalies externes ;
- détection ;
- prévention.

Il est traditionnel de considérer que l'objectif est de trouver l'optimum conformément au graphique ci-dessous. Notre expérience nous a montré que cela n'est absolument pas réaliste. En effet, dans une vision dynamique de l'entreprise, les coûts sont sans cesse en train d'évoluer avec les gains de productivité, ce qui rend impossible la recherche de cet optimum (*Figure 9.4*). De plus cette démarche de recherche de « l'optimum du coût des non-qualités » a depuis longtemps été remplacée par celle de « l'amélioration permanente ». C'est la limitation naturelle des coûts d'investissement qui limitera les frais de prévention.

● Modalités d'évaluation

On distingue deux approches.

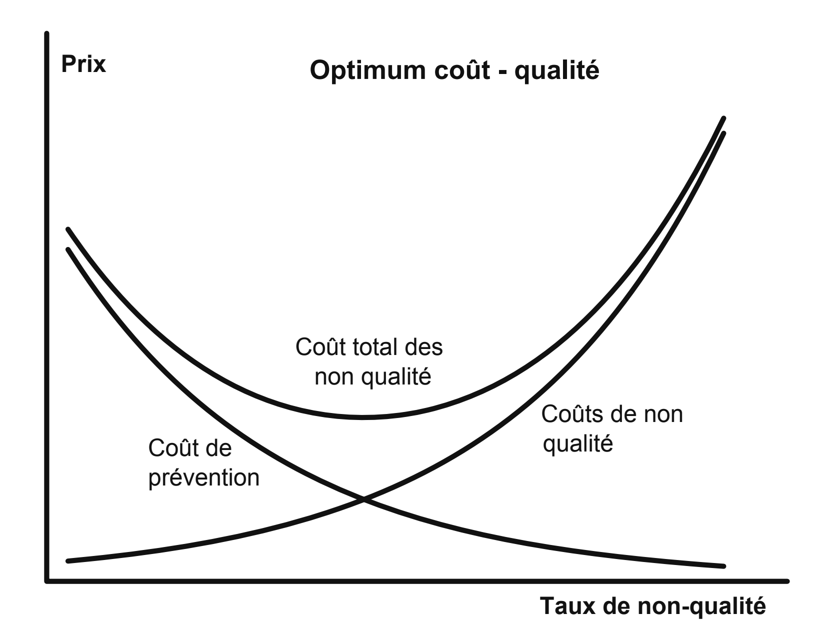


Figure 9.4 Optimum coût-qualité

1-Approche analytique

Elle consiste à analyser des coûts par catégorie : par produits, par type de défauts, par cause de défauts, par période, etc. Cette approche est orientée vers l'action.

Elle est surtout intéressante lorsqu'on se concentre sur les anomalies internes et externes et sur les tris mis en place du fait de taux de défauts anormaux et lorsqu'elle est orientée vers la recherche de solutions concrètes.

Exemples :
- calcul de coûts de non-conformité en production par origine et par cause ;
- analyse du coût d'un retour client par catégorie de produit et de défaut.

2-Approche globale

Elle permet de dégager des coûts pour l'ensemble de la non-qualité sur une période assez longue.

Par exemple :
- le coût des activités de contrôle d'un atelier ;
- le coût du service qualité ;
- le coût de l'ensemble des défauts.

Les calculs s'appuient sur :

– la comptabilité générale ;
– la comptabilité analytique ;
– les estimations par sondage.

Cette approche est orientée vers la motivation et la gestion.

Elle est surtout intéressante lorsque l'on se concentre sur quelques aspects concrets.

Exemple : la répartition des fonctions du service qualité (promotion, analyse des problèmes, contrôles, formation, assurance de la qualité…)

Nous résumons dans le tableau suivant (*Tableau 9.3*) les deux méthodes d'évaluation.

Tableau 9.3 Différentes méthodes de calcul

Approche	Analytique	Globale
Types de calcul	Par catégories de défauts Par causes Par thème (ex : processus d'un retour client) Etc.	Par catégories (anomalies, détection, prévention)
Objectifs	L'amélioration	La gestion, la motivation
Modes de calcul	Comptabilité analytique Prix de revient Estimations (p %, bons de retouches…)	Comptabilité générale, sondages, estimations

● **Difficultés théoriques**

Les difficultés rencontrées à l'expérience à l'utilisation de cette méthode sont les suivantes :

– La qualité est ramenée au niveau des anomalies et nous nous sommes déjà exprimés sur ce point.
– La prévention est impossible à isoler clairement ; on ne peut dissocier « performances » des produits et « non-conformités », ni dégager ce qui concerne les améliorations générales de l'amélioration de la qualité, exemple : la formation du personnel.

– La recherche d'un optimum entre les différents coûts s'avère irréaliste.
– Le contrôle est considéré comme faisant partie des non-conformités donc un coût considéré comme anormal. On devrait faire la distinction entre les différents types de contrôle :
  - les contrôles ayant pour but de corriger les produits (les tris) correspondent à une situation anormale et méritent d'être intégrés dans les coûts de non-conformité ;
  - les contrôles dont le but est de s'assurer que l'on respecte bien les spécifications et d'évaluer le niveau réel de la qualité. Il est certes bon d'optimiser ce type de contrôles en en minimisant les coûts, mais ces contrôles restent souhaitables et même indispensables et relèvent de la prévention.

● **Réflexions sur la non-conformité**

Nous employons les expressions « non-qualité » ou « non-conformité ». Cela est pratiquement la même chose mais nous réserverons l'expression « non-conformité » pour exprimer qu'il n'y a pas conformité à une spécification.

● **Conclusions sur le calcul des coûts de non-qualité**

En conclusion, l'approche de l'évaluation des coûts de non-qualité est très pertinente à condition de :

– considérer en priorité : les anomalies internes, les anomalies externes, les « tris » (contrôles dont le but principal est d'éliminer les défauts) ;
– ne considérer les activités de prévention que sur des points spécifiques afin notamment de mettre en évidence des insuffisances (par exemple : quelle est la part des activités de prévention dans le service qualité ?) ;
– ne calculer les coûts des contrôles d'évaluation que dans le but de les optimiser ;
– ne pas rechercher un optimum global mais en faire un outil de motivation, de gestion ou d'analyse dans une optique d'amélioration permanente.

9.4.3 Analyse des coûts de la fonction qualité

On peut analyser les fonctions selon leur nature, par exemple en se référant aux catégories suivantes (organisation, politique, management, gestion/assurance de la qualité, documentation, formation, contrôles, analyses, actions

correctives, etc.) ou selon leur champ d'action : marketing, conception, production, achats.

Le but est de s'assurer du bon équilibre entre les différentes fonctions assurées et de son adéquation avec les problèmes qualité et les priorités de l'entreprise.

9.4.4 Analyse et réduction des coûts de contrôle

La pratique des techniques de contrôle par prélèvement peut apporter des réductions très sensibles des coûts de contrôle. La norme NF ISO 2859-1 est le document de référence pour l'établissement d'un plan de contrôle par échantillonnage ; elle est basée en totalité sur la recherche d'un optimum coût-qualité. Nous insistons seulement sur le fait qu'il existe des méthodes insuffisamment utilisées telles que :

- les prélèvements doubles ou multiples ;
- les prélèvements séquentiels ;
- le contrôle aux mesures

  qui permettent d'économiser beaucoup d'argent.

L'optimisation de la mise sous contrôle ou surveillance d'une production est également une source de profit important.

Les actions de prévention, sans prétendre éliminer tous les contrôles, doivent toujours être privilégiées.

Mais il reste indispensable de réaliser des contrôles. On peut s'étonner de ce que certains disent que les contrôles sont appelés à être supprimés au profit de la prévention. Cela est en contradiction avec un principe de la qualité selon lequel il faut toujours s'assurer que l'objectif poursuivi est atteint.

9.4.5 Analyse des « non-qualités » dans les services

Il s'agit de généraliser aux services les coûts de non-qualité.

Mais l'approche doit être adaptée. Cela pourra prendre une des formes suivantes :

- analyse du temps passé à réparer les erreurs ;
- analyse des frais liés aux erreurs ;
- analyse du processus répétitif d'une non-conformité, par exemple : le coût d'une facture erronée.

On se référera utilement à l'analyse des « processus » pour étudier un tel sujet.

9.5 Choix des méthodes

Nous sommes devant le problème classique des outils de la qualité. Ils sont nombreux et la tentation est de dire qu'il faut les utiliser tous. Il est un fait que toutes les méthodes évoquées sont complémentaires donc ne présentent pas de redondances. Mais chaque entreprise a ses spécificités et le problème est de choisir les outils adaptés.

Une entreprise qui a beaucoup de retours clients ou des problèmes de dysfonctionnement aura intérêt à mettre en place une évaluation des coûts de non-qualité. Celle qui est handicapée par le prix de ses produits et la pénétration du marché aura peut-être intérêt à implanter « l'analyse de la valeur » et « l'analyse de la concurrence ».

Une industrie de *process* complexe aura sans doute besoin d'outil pour optimiser sa mise sous contrôle, etc.

9.6 Bilan des méthodes de « l'économie de la qualité »

Nous résumons l'ensemble des méthodes dans les deux tableaux suivants (*Tableau 9.4*).

Tableau 9.4 Méthodes relatives à l'économie de la qualité et orientées sur l'analyse et l'amélioration de la relation qualité/coûts

Méthode	Principe	Objectif	Domaine
Analyse de la concurrence sur les plans qualité et coûts	Comparer d'une façon systématique les produits de l'entreprise à ceux de la concurrence sur les plans qualité, prix, logistique	Tirer les leçons pour les développements à venir	Conception Marketing
Analyse fonctionnelle	Au début de la conception d'un produit ou service, rechercher systématiquement toutes les composantes du besoin sous forme de fonctions à assurer	Optimiser le rapport qualité/prix	Conception
Analyse de la valeur	Analyser systématiquement le coût associé à chaque fonction[4]	Trouver les solutions les plus économiques permettant de remplir les fonctions requises	Conception
Calcul de la rentabilité d'un investissement qualité	Traiter les investissements dans le domaine de la qualité comme tout investissement afin de mettre en évidence sa rentabilité. Exemple d'investissement : *Formation, équipement de contrôle, mise en place d'une méthode, adoption d'un logiciel…*	Optimiser le choix des solutions pour améliorer la qualité	Tout domaine

4. Selon les normes, l'analyse fonctionnelle fait partie de l'analyse de la valeur (norme NF X50-152 et cahier des charges fonctionnel : norme NF X50-151).

Tableau 9.4 Méthodes relatives à l'économie de la qualité et orientées sur l'analyse et l'amélioration de la relation qualité/coûts (fin)

Méthode	Principe	Objectif	Domaine
Coût du cycle de vie ou coût global	Calculer, dès la conception, l'ensemble des coûts que le client devra supporter durant toute la vie du produit et ceci afin d'en optimiser le total que l'on appelle le coût global ou le coût de possession. Ces coûts sont dépendants de la fiabilité du produit, des conditions de maintenance, du coût de recyclage ou destruction du produit en fin de vie, etc.	Vendre des produits qui coûteront globalement moins cher au client même si le prix de vente est plus élevé	Conception
Conception à coût objectif	Gérer un programme permettant de guider la conception d'un produit nouveau afin de satisfaire au mieux les objectifs de coût de production, de délai et de performances.	L'objectif de la conception à coût objectif (CCO) ou *Design To Cost* (DTC) est de concevoir le produit en respectant un objectif de coût unitaire de production.	Conception
Conception à coût global	Il s'agit de la même méthode que la CCO, mais en y intégrant le coût global. Elle s'inspire donc fortement des principes du « coût du cycle de vie ». Ces méthodes CCO, CCG sont appliquées essentiellement pour les gros projets. Elles trouvent leur application dans les cas où le prix de vente est plafonné	L'objectif de la conception à coût global (CCG) a le même objectif que la CCO.	Conception
Analyse des coûts de la fonction qualité	Le but est d'assurer le bon équilibre entre les différentes fonctions et leur adéquation avec les problèmes qualité et les priorités de l'entreprise.	Optimiser les actions des services qualité	Qualité

Tableau 9.5 Méthodes relatives à l'économie de la qualité et orientées sur la réduction des coûts et l'optimisation des actions[5]

Méthode	Principe	Objectif	Domaine
Calcul et réduction des coûts de non-qualité[5]	1 Faire une évaluation systématique des coûts selon les catégories : – anomalies internes ; – anomalies externes ; – détection ; – prévention. 2 Optimiser ces coûts qui sont interdépendants. Une approche plus moderne consiste plutôt à développer les coûts de prévention voire de détection pour réduire la non-qualité.	Réduire les non-qualités en cours de conception, fabrication et vente des produits dans une optique de réduction des coûts tout en respectant le niveau de qualité requis voire en l'améliorant	Tout domaine mais principalement : – conception ; – production ; – qualité ; – vente
Analyse des coûts de la fonction qualité	Le but est d'assurer le bon équilibre entre les différentes fonctions et leur adéquation avec les problèmes qualité et les priorités de l'entreprise.	Optimiser les actions des services qualité	Qualité
Analyse et réduction des coûts de contrôle	Optimiser les échantillonnages de contrôle. Les tables de la norme NF ISO 2859-1 peuvent répondre à cet objectif. Adapter les contrôles aux risques potentiels, notamment en production	Réduire les coûts de contrôle tout en gardant leur efficacité.	Contrôle de : – production, – réception, – sortie

5. Voir norme AFNOR X50-126

Tableau 9.5 Méthodes relatives à l'économie de la qualité et orientées sur la réduction des coûts et l'optimisation des actions (fin)

Méthode	Principe	Objectif	Domaine
Optimiser les échantillonnages de contrôle. Les tables de la norme NF ISO 2859-1 peuvent répondre à cet objectif. Adapter les contrôles aux risques potentiels, notamment en production	Réduire les coûts de contrôle tout en gardant leur efficacité.	Contrôle de : – production, – réception, – sortie	
MSP (Maîtrise Statistique des procédés[6])	Recherche systématique de l'amélioration du procédé de production préalablement à un suivi rigoureux par des contrôles en continu des résultats tout le long du procédé de fabrication[7]	Garder une bonne maîtrise de la qualité en production	Production

6. Plus souvent connu sous le nom anglais de SPC (Statistical Process Control).
7. Certaines entreprises en font un outil d'amélioration de la qualité avec une optique de gain de productivité qui peut être très intéressant.

10

Le traitement statistique des données et le management de la Qualité

10.1 Traitements de données statistiques et management de la Qualité

Le management de la Qualité implique de traiter beaucoup de données. Citons quelques exemples de domaines qui peuvent être source de nombreuses informations à traiter :

– Clientèle ;

– Achats, fournisseurs ;

– Production ;

– Conception ;

– Gestion des processus.

Il est évidemment impossible d'étudier l'ensemble du thème du traitement des données, sujet très vaste, mais nous allons donner quelques bases en évitant autant que possible les démonstrations théoriques et les équations.

10.2 Différents types de données

Il nous faut distinguer :

– Les données par **attribut** c'est-à-dire non mesurables et qui s'expriment en termes qualitatifs : Exemple : sur 100 produits : nombre de défauts par catégorie (3 défauts A, 5 défauts B, 2 défauts C).

  On utilise aussi l'expression de « variables discrètes ».

– Les données aux **mesures** : Exemple : longueur des pièces : 15, 16, 14... mm.

  On utilise aussi l'expression de variables continues.

Nous verrons par la suite l'importance de cette distinction.

10.3 Variabilité et les lois de probabilité

Deux résultats d'un processus répétitif ne sont jamais parfaitement identiques. Seule une précision de mesure insuffisante peut donner l'illusion d'une parfaite identité.

Un résultat est toujours dépendant d'un grand nombre de causes plus ou moins identifiées ou identifiables, et les variations constatées sont régies par **des lois de probabilité**.

L'intérêt de faire référence à des lois est que, devant un ensemble de données, on pourra tirer des conclusions sur la validité des interprétations et faire des extrapolations.

Cette variabilité rend nécessaire le relevé d'un nombre de données qui peut être important pour valider leur exploitation. C'est le propre des méthodes statistiques de permettre une interprétation correcte des données.

10.4 Vue d'ensemble des méthodes statistiques

Il existe un très grand nombre de méthodes statistiques. Il est hors de question de les aborder toutes mais notre expérience nous a montré qu'une sélection d'un

nombre relativement réduit d'entre elles permettait de traiter la majorité des problèmes rencontrés dans le domaine de la qualité. Dans un premier temps nous allons survoler ces différentes méthodes pour établir une sorte de classement. Puis nous les étudierons plus dans le détail pour les principales.

Nous distinguons deux grands domaines : la statistique descriptive et la statistique mathématique.

10.4.1 La statistique descriptive

Elle consiste à présenter les données recueillies d'une façon telle que cela donne une vision synthétique et facilite l'interprétation.

Exemple :

- Histogramme (représentation d'un ensemble de données relatives à une variable)
- Camembert
- Pareto
- Graphique de corrélation ou de régression (entre deux variables)
- Graphique chronologique
- Etc.

10.4.2 La statistique mathématique

Dans ce cas, **les données recueillies sont considérées comme un échantillon représentatif d'une population** plus large ou plus généralement d'une population répondant à des lois de probabilité.

On parle alors du « jugement sur échantillon » avec l'utilisation de deux approches complémentaires.

● L'estimation

À partir des données relatives à l'échantillon, on estime des paramètres statistiques de la population ou de la loi qui la régit.

Par exemple :

- Une proportion (de défauts dans un lot, de personnes non satisfaites…) ;
- La valeur moyenne et l'écart type[1] d'une variable mesurable (par exemple : une caractéristique d'un produit, un indicateur médical d'une personne, un paramètre financier…) ;

1. L'écart type mesure la dispersion de valeurs.

– La loi de probabilité qui régit les résultats obtenus sur cette variable ;
– Un coefficient de corrélation, les paramètres d'une régression ;
– Etc.

La statistique mathématique permet d'associer à une estimation un « **Intervalle de Confiance** » avec un « **seuil de confiance** ».

Par exemple, partant d'un échantillon de 20 produits, la longueur moyenne d'une pièce est de 50 mm avec un intervalle de confiance de ± 2, au seuil de confiance à 95 %. Ce qui signifie que l'intervalle 48 à 52 mm a 95 % de probabilité d'encadrer la valeur vraie. On verra plus loin comment faire de tels calculs.

● **Le test d'hypothèse**

C'est une façon différente ou complémentaire à l'estimation d'analyser les données statistiques. On pose une question (en langage statistique on dit que l'on fait une hypothèse) et l'on répond par l'acceptation ou le rejet de l'hypothèse.

Exemple :
– La loi de probabilité est-elle de Gauss ?
– Les deux proportions sont-elles différentes ?
– Les deux moyennes sont-elles différentes ?
– L'écart type a-t-il évolué ?
– Le coefficient de corrélation est-il significativement différent de 0 ?

À la réponse est **associé un seuil de confiance**.

Par exemple : l'hypothèse de la différence entre deux proportions ne peut pas être refusée au seuil de confiance à 95 %.

10.4.3 La statistique multidimensionnelle et l'analyse des données

On peut s'intéresser à :

– une seule variable, une variable continue *x*, ou une variable discrète prenant les états A, B, C… ou 0, 1 par exemple.
– deux variables (*x*, *y*). Dans ce cas on considère **leur corrélation** (il n'y a pas *a priori* une de relation de cause à effet) ou à **la régression (linéaire ou non)**, c'est-à-dire que l'on recherche la formule qui relie y en fonction de *x* étant admis *a priori* que *y* dépend de *x*.

– plus de deux variables. Dans ce cas on généralise au recueil de variables qui peuvent être très nombreuses, continues ou discrètes (*voir l'exemple du Tableau 10.3*). Et l'on se trouve en face de très nombreuses méthodes qui forment ce que l'on appelle **l'analyse des données**. Ces méthodes peuvent relever des deux domaines que nous venons d'évoquer :
  - la statistique descriptive. Citons l'analyse factorielle qui s'applique à des variables continues. Il en existe plusieurs notamment l'ACPN (Analyse en composantes principales normée) vers laquelle va notre préférence.
  - la statistique mathématique. Citons la multirégression (linéaire ou non) ou l'analyse de la variance.

10.5 Bilan de méthodes statistiques sélectionnées

Le tableau 10.1 (*page suivante*) fait un bilan des différentes méthodes que nous avons sélectionnées.

10.6 Statistique descriptive

Nous allons passer en revue l'essentiel de ces méthodes.

Par principe, lorsque nous présentons une méthode avec un jeu de données, nous avons fait le choix de ne pas donner un cas concret d'application, laissant au lecteur le soin d'identifier un cas concret dans son domaine de travail.

10.6.1 L'histogramme

Disposant pour une caractéristique mesurable x de n résultats, l'histogramme en donne une représentation graphique de la façon suivante (*voir graphique de la Figure 10.1*) :

– on découpe l'axe des x en plusieurs plages dites « classes » (9,5 à 10,5 ; 10,5 à 11,5 ; etc.) ;

– on porte sur chaque classe un rectangle dont la hauteur est égale au nombre de données dans la classe et que l'on appelle « la fréquence » que l'on note f.

Pour les n = 20 données de notre exemple, on calcule :

La moyenne qui donne un bon indicateur du centrage des données :

$$m = \sum_{i=1}^{n} f_i x_i \quad (m = 13 \text{ dans notre exemple})$$

La variance s^2 (ou l'écart type s, sa racine carrée) qui donne un bon indicateur de la dispersion des données autour de la moyenne :

$$s^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{f_i (x_i - m)^2}{n} \quad (s^2 = 2{,}05 \text{ et } s = 1{,}43 \text{ dans notre exemple})$$

Tableau 10.1 Traitement statistiques des données

Statistique descriptive	Présentation des données pour en donner une vision synthétique et permettant l'exploitation
Exemples	
Monodimensionnel	Multidimensionnelle
Histogramme Camembert Diagramme de Pareto	Graphique de corrélation Graphique chronologique Analyse factorielle (ACPN)
Statistique mathématique	Données considérées comme un échantillon représentatif d'une population
Estimation	**Test d'hypothèse**
Intervalle de Confiance avec un seuil de confiance	Réponse par oui ou non Avec un seuil de confiance
Exemples	
Proportion p = 10 % ± 2 % au seuil à 95 % Moyenne m = 50 ± 3 au seuil à 90 %	La loi de probabilité est-elle de Gauss ? Les deux proportions sont-elles différentes ? Les deux moyennes sont-elles différentes ?
Régression linéaire : $y = b_0 + b_1 x + e$ (e variable aléatoire) Multi régression linéaire $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \ldots + e$ On estime les coefficients : b_0, b_1, b_2…, l'écart type de e.	Pour une régression : Les coefficients b_1, b_2… de la régression sont-ils significatifs e suit-il une loi de Gauss ?
L'Analyse de la variance : $y = m + a_i + b_j + ab_{ij} + e$ (exemple à 2 dimensions) (e variable aléatoire)	Les estimations a_i b_j ab_{ij} sont-elles significatives ? e suit-il une loi de Gauss ?

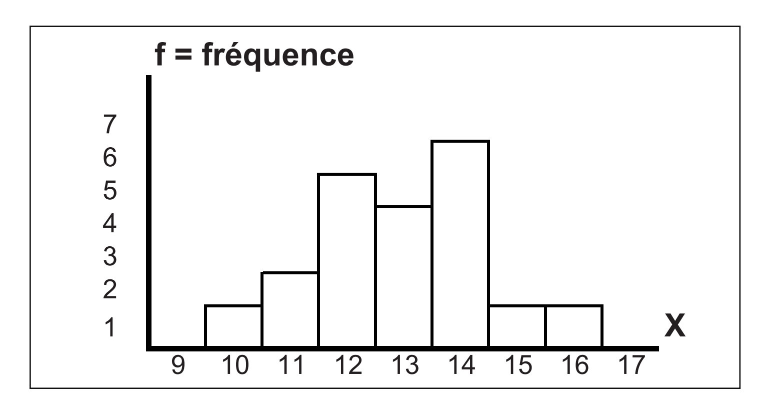


Figure 10.1 Histogramme de fréquences

Parfois on préfère représenter l'histogramme sous forme de fréquences cumulées (*Voir Figure 10.2*).

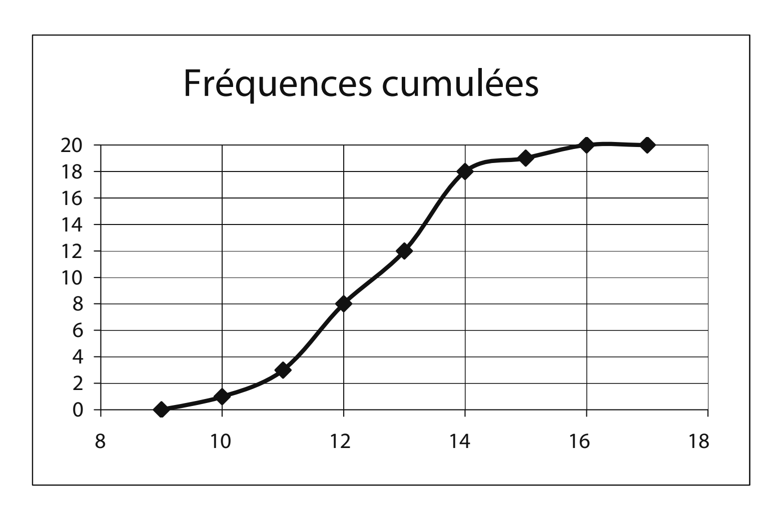


Figure 10.2 Histogramme de fréquences cumulées

10.6.2 Le graphique de Pareto

Considérons une variable par attribut.

Prenons l'exemple des différents types de défauts qui peuvent affecter un produit. Sur notre graphique nous les avons appelés A, B, C, etc.

On relève pour chaque type de défaut un critère marquant son importance. Par exemple une quantité, une proportion ou le coût des conséquences associées à chacun d'entre eux.

Le graphique a la particularité de représenter les défauts par ordre d'importance. La plupart du temps il a une forme décroissant rapidement comme sur notre exemple.

Ce graphique tout simple a une importance très grande dans les démarches qualité car il permet de voir qu'en traitant un nombre réduit de problèmes, pourvu que l'on sélectionne les plus importants, on peut améliorer grandement la qualité. On se place dans une logique d'amélioration basée sur la fixation des priorités. Nous notons que cette stratégie est en conflit avec celle dite du « Zéro défaut » qui n'a d'ailleurs pas notre préférence.[2]

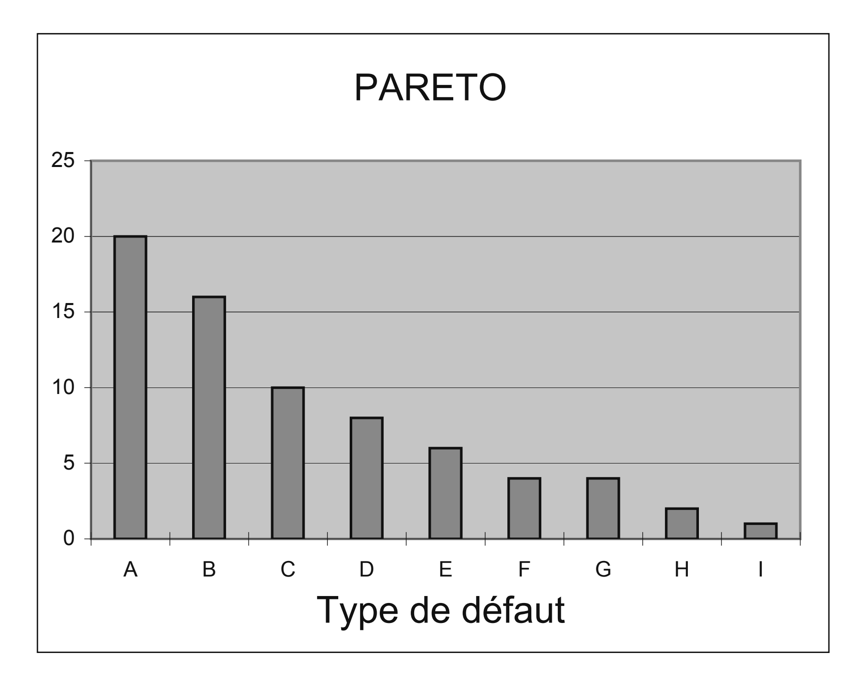


Figure 10.3 Graphique de Pareto

2. Vilfredo Pareto était un sociologue et économiste italien du début du XXe siècle. Il a démontré que, dans certaines conditions, la distribution des revenus se faisait selon la forme du graphique que nous présentons. Le professeur Juran montrait un certain désappointement à voir que l'on donnait ce nom inattendu à un principe qu'il avait mis en valeur il y a longtemps qu'il qualifiait d'une expression du type « beaucoup avec peu » (nous ne garantissons pas la rigueur au mot près de l'expression employée).

10.6.3 Le graphique de corrélation

Il met en évidence un lien entre deux variables. La force de ce lien est mesurée par un coefficient de corrélation qui va de 0 à 1 :

– 0 : aucune corrélation (les points sont répartis de façon anarchique) ;
– 1 : corrélation parfaite (les points sont alignés sur une courbe, si la courbe est une droite on parle d'une corrélation linéaire).

Nous ne donnons pas les formules. Un tableur comme Excel dispose d'une fonction calcul du coefficient de corrélation.

Mais ce graphique peut être très trompeur car une corrélation ne signifie par forcément une relation de cause à effet, et s'il y en a une on ne sait pas *a priori* si c'est *y* qui dépend de *x* ou *x* qui dépend de *y*.

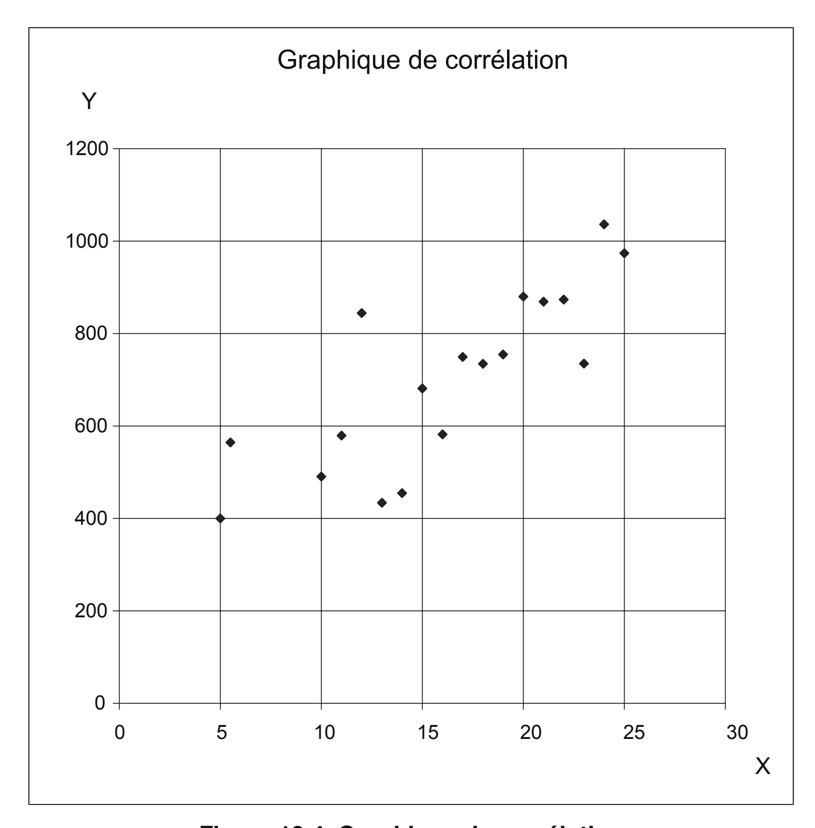


Figure 10.4 Graphique de corrélation

10.6.4 Le graphique de régression

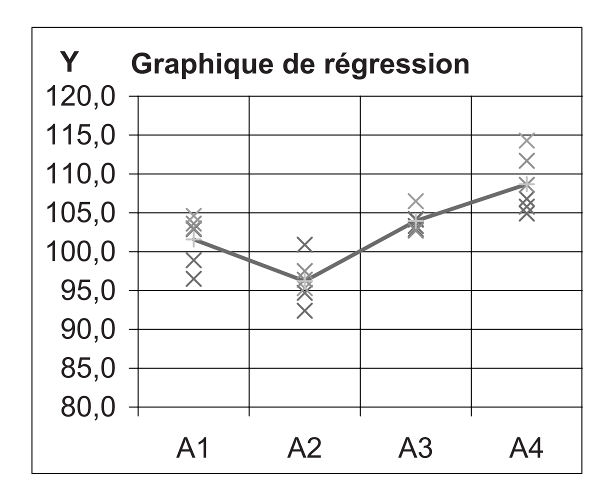
Dans la continuité du graphique de corrélation il s'agit d'un même graphique mais dans ce cas on part du principe que *y* est fonction de *x*.

Ce graphique se généralise au cas où *y* dépend d'une variable par attribut *A* (discrète). Le Tableau 10.2 donne un exemple.

Tableau 10.2 Données pour *y* = f (A)

A1	A2	A3	A4
96,5	92,4	102,9	106,8
98,9	94,7	103,3	105,8
103,6	97,5	104,1	108,6
102,9	100,9	104,2	104,9
104,6	95,3	106,5	114,3
103,0	96,4	102,7	111,7

Le graphique de la Figure 10.5 en donne une représentation graphique.



m	101,58	96,20	103,95	108,68
s	3,16	2,87	1,39	3,66

Figure 10.5 Représentation graphique de la régression *y* = f (A)

10.6.5 Le graphique chronologique

Ce graphique montrant l'évolution d'une caractéristique dans le temps est souvent très instructif pour comprendre les causes des problèmes. Les deux graphiques ci-dessous sont très différents :

– le 1er (*Figure 10.6*) montre le cas d'une caractéristique qui a tendance à varier dans le temps ;

– le 2nd (*Figure 10.7*) montre le cas d'une caractéristique stable affectée seulement de variations instantanées aléatoires.

Mais est-ce si évident ? En fait ce sera l'apport de la statistique mathématique de mettre à disposition des outils permettant de valider les hypothèses ainsi énoncées.[3]

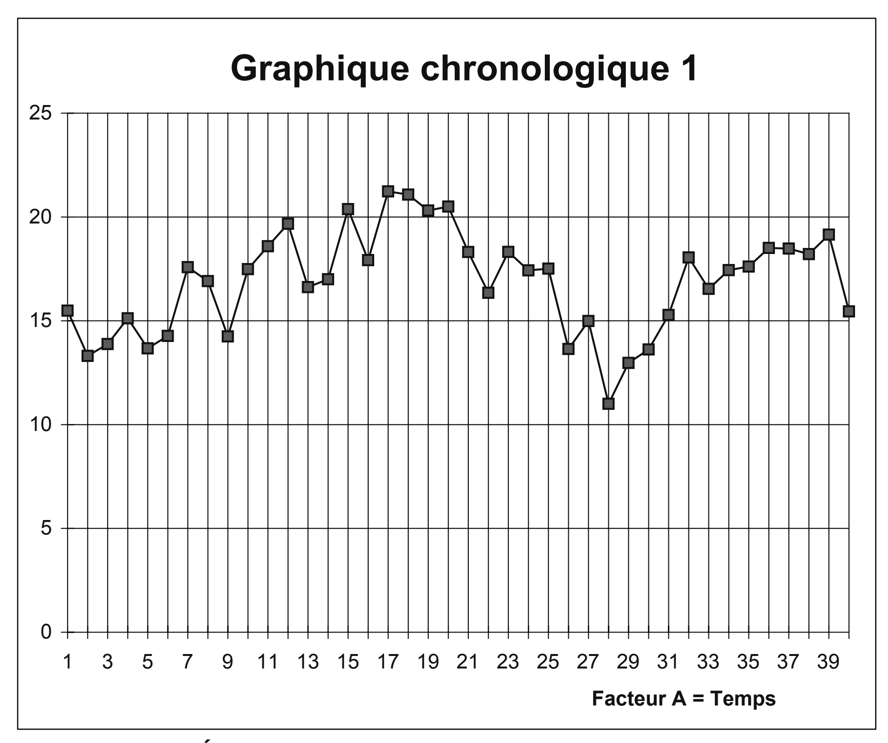


Figure 10.6 Évolution en fonction du temps marquant une variation

3. Nous avons indiqué pour l'axe des x « Facteur A = temps » cela en vue de la généralisation de $y = f(A)$.

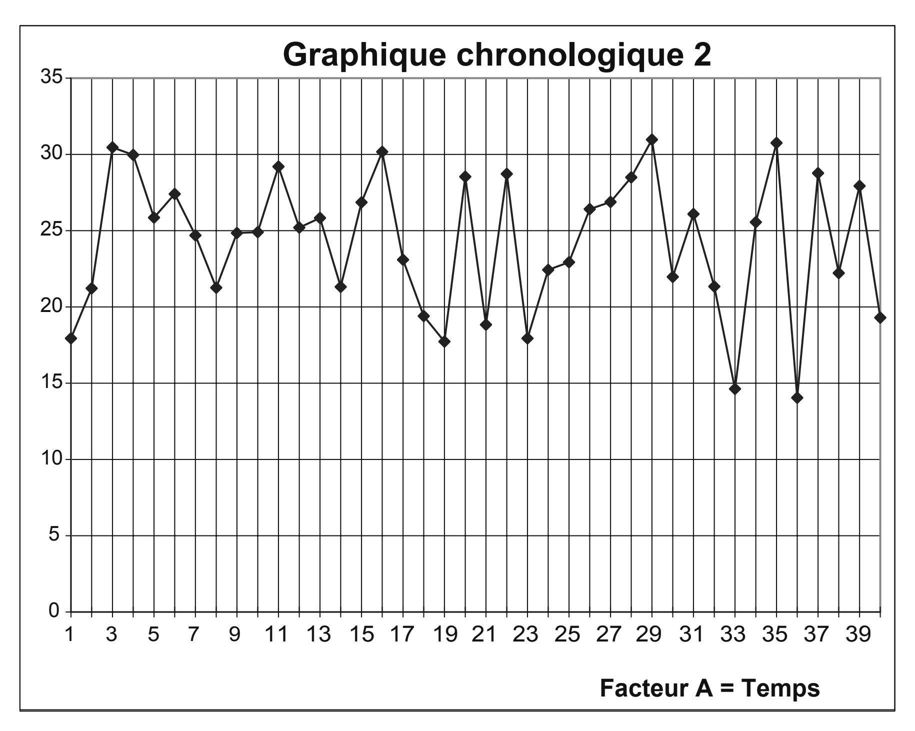


Figure 10.7 Évolution en fonction du temps marquant une absence de variation moyenne

10.6.6 L'analyse factorielle

L'analyse factorielle comprend tout un ensemble de méthodes mais, pour l'avoir appliquée abondamment, nous en avons sélectionné une particulière qui s'applique à des variables continues : l'ACPN.

Examinons le Tableau 10.3. Nous disposons pour n = 25 individus ou produits des valeurs correspondant à p = 8 caractéristiques. Le choix des noms pour les caractéristiques (X_1, X_2… Y_1, Y_2…) pourraient faire penser comme on le fera en multirégression linéaire qu'il y a une relation du type les Y dépendant des X. Or, dans cette méthode, on ne fait aucune hypothèse de ce type.

L'ACPN est une méthode descriptive qui consiste à projeter :

– l'ensemble vectoriel à n = 25 dimensions (nombre de lignes) dans un sous-ensemble vectoriel à deux dimensions (c'est-à-dire un plan), chaque point représentant un individu et une proximité entre plusieurs points marque que les individus correspondant se ressemblent ;

Tableau 10.3 Résultats expérimentaux

N°	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	10	0,01	13	7	43,02	0,00	43,02	43,47
2	10	0,48	13	4	41,42	2,00	43,42	44,14
3	11	0,71	4	13	34,43	3,00	37,43	37,14
4	13	0,20	12	11	48,48	3,00	51,48	51,06
5	13	0,10	10	6	39,22	0,00	39,22	39,13
6	13	0,88	7	5	35,31	0,00	35,31	34,66
7	15	0,32	11	5	42,84	2,00	44,84	44,51
8	12	0,94	6	9	36,65	3,00	39,65	40,42
9	13	0,14	5	8	31,32	5,00	36,32	36,53
10	12	0,44	11	7	42,27	2,00	44,27	44,25
11	12	0,61	9	12	43,96	2,00	45,96	45,99
12	15	0,98	7	5	37,88	2,00	39,88	39,34
13	15	0,93	4	9	35,59	3,00	38,59	38,69
14	10	0,22	8	9	35,54	3,00	38,54	37,84
15	10	0,84	12	10	47,09	0,00	47,09	46,54
16	10	0,02	8	8	34,04	0,00	34,04	33,83
17	10	0,38	6	9	32,05	2,00	34,05	34,43
18	12	0,60	8	7	36,92	3,00	39,92	40,12
19	12	0,65	10	11	45,15	3,00	48,15	47,32
20	13	0,99	8	12	44,94	0,00	44,94	45,36
21	13	0,74	4	4	27,58	0,00	27,58	27,96
22	13	0,74	10	10	45,58	0,00	45,58	45,39
23	13	0,89	9	7	41,36	1,00	42,36	41,47
24	15	0,13	8	10	41,29	1,00	42,29	43,58
25	15	0,27	10	9	44,69	-2,00	42,69	42,98

– l'ensemble vectoriel à $p = 8$ dimensions (nombre de colonnes) dans un sous-ensemble vectoriel à deux dimensions (c'est-à-dire un plan), mettant en évidence les corrélations éventuelles entre les variables.

Le seul énoncé de la méthode montre que l'on peut arriver à des méthodes très complexes sur le plan des calculs ou de la théorie mais cependant de mise en œuvre relativement simple. Les calculs sont basés sur des « diagonalisations de matrices ». Mais il existe des logiciels tout faits, il n'y a donc pas de difficulté de ce côté.

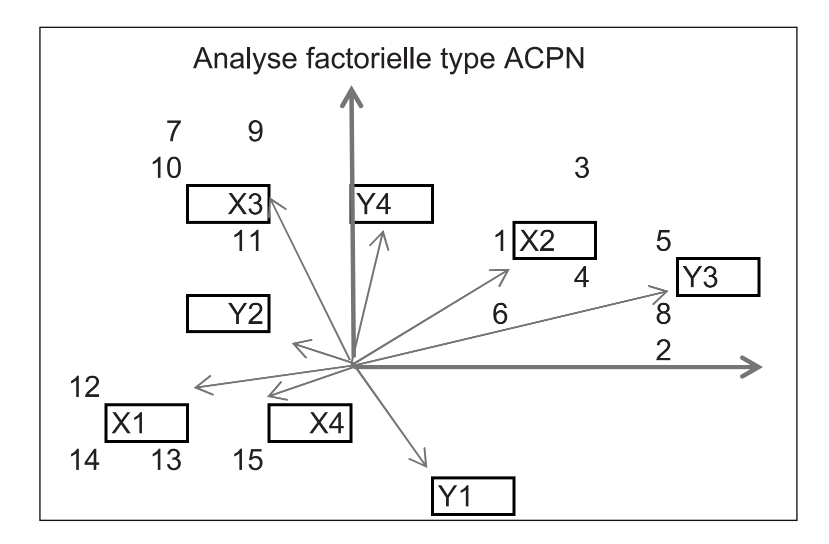


Figure 10.8 Analyse en composante principale normée

Les interprétations sont très simples. Sur la Figure 10.8, on voit que les individus 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 se « ressemblent » car ayant des valeurs voisines pour les variables X_2 et Y_3. En effet, ils forment un nuage de points et les vecteurs X_2 et Y_3 sont orientés vers ce nuage. De même le fait que ces deux vecteurs forment un angle réduit laisse entendre qu'ils sont corrélés.

Il faut bien sûr un certain apprentissage pour cette interprétation mais un non-statisticien pourra acquérir rapidement cette expérience.[4]

Cette méthode est utilisée classiquement dans des analyses de population à des fins commerciales ou politiques. En qualité nous pouvons l'utiliser dans des enquêtes d'opinion ou satisfaction clientèle. Pour notre part, nous l'avons

4. Attention : le graphique, pour des raisons pratiques, ne correspond pas au jeu de données proposé.

utilisée abondamment pour l'étude des données de production relatives aux produits fabriqués.

10.7 Statistique mathématique

Maintenant, nous allons supposer que les résultats sont régis par des formules et des lois de probabilité.

10.7.1 La loi de Gauss (ou loi Normale)

Cette loi de probabilité est illustrée par le graphique de la Figure 10.9. On note :

- sa moyenne[5] μ,
- son écart type σ[6], ou sa variance σ^2

La forme en cloche de la loi de Gauss est très caractéristique, montrant que plus on s'éloigne de la moyenne, moins il est probable de trouver un résultat.

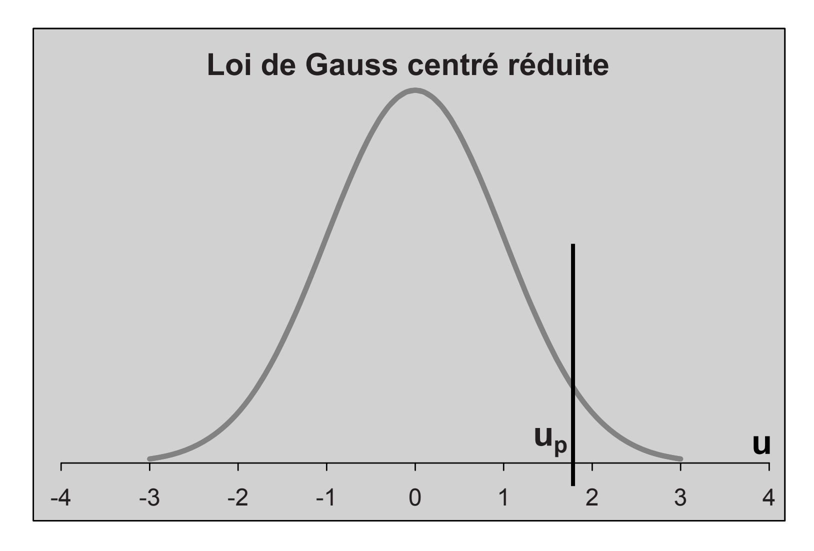


Figure 10.9 Loi de Gauss

5. En toute rigueur il faudrait dire son « espérance mathématique ».
6. Il est traditionnel d'utiliser des lettres grecques lorsque l'on se réfère à une loi de probabilité et des lettres classiques lorsque l'on en exprime une estimation, ici μ (mu), σ (sigma). Ce ne sera pas le cas dans l'étude des proportions.

Mais on se trouve devant une difficulté : il y a une infinité de lois de Gauss compte tenu que la moyenne et l'écart type peuvent prendre une infinité de valeurs. On contourne la difficulté avec la loi de Gauss centrée réduite. Centré signifie que l'on prend comme moyenne 0, réduite que l'on prend comme unité l'écart type, la variable aléatoire est notée traditionnellement *u*. Donc pour une variable *x* quelconque la transposition se fait par la formule :

$u = \dfrac{x - \mu}{\sigma}$ et s'il s'agit d'un résultat expérimental : $u = \dfrac{x - m}{s}$

Il ne nous paraît pas nécessaire de fournir la table de la loi de Gauss car elle fait partie des formules du tableur Excel.

La loi est symétrique. La table donne pour une valeur u_p particulière la probabilité de trouver un résultat inférieur à cette valeur. Par exemple pour $u_p = 1,8$ comme sur notre graphique $Pr [u < u_p] = 0,802$.

Voici quelques chiffres caractéristiques :

$u = 0$	$P_r = 0,50$		
$u = 1,96$	$P_r = 0,975$	$u = -1,96$	$P_r = 0,025$
$u = 3$	$P_r = 0,9986$	$u = -3$	$P_r = 0,014$

En se rappelant que l'unité choisie dans le graphique est $\sigma = 1$ nous pouvons dire que la probabilité de se trouver :

entre – 1,96 et + 1,96 fois σ est de 95,00 % (environ – 2 σ à + 2 σ)
entre – 3 et + 3 fois σ est de 99,73 %

Cela donne un sens concret à l'écart type.

Reprenons notre histogramme de fréquences du paragraphe 1.6 2. Nous considérons maintenant que les *n* = 20 données étaient un échantillon pris dans une population importante et répondant. Nous faisons l'hypothèse que cette population est régie par une loi de Gauss (*Voir Figure 10.10*). Cette hypothèse est fréquente car la plupart des phénomènes répondent à cette loi. Elle peut être vérifiée par des tests d'hypothèse que nous n'abordons pas (χ^2 ou Kolmogorov Smirnov).

On estime les caractéristiques de la loi :

μ : par $m = \sum_{i=1}^{n} f_i x_i$ (m = 13 dans notre exemple)

σ² : par $s^2 = \sum_{i=1}^{n} \dfrac{f_i (x_i - m)^2}{n-1}$ ($s^2 = 2,16$)

σ : par s la racine carré de s^2 (*s* = 1,33 dans notre exemple)

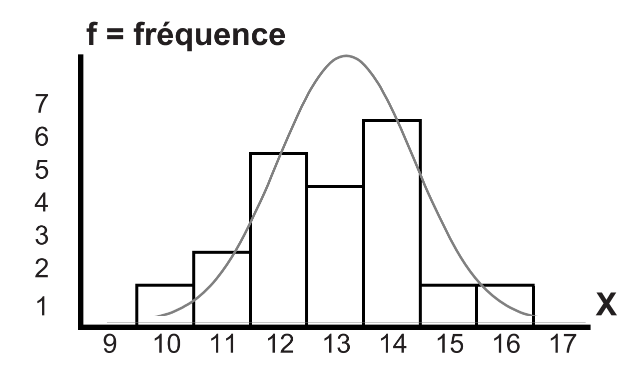


Figure 10.10 Ajustement d'un histogramme à une loi de Gauss

Il faut insister sur cette division par $n - 1$ et non par n comme nous l'avions fait dans le cadre de la statistique descriptive. La raison se trouve dans la théorie de l'estimation où l'on démontre qu'il faut diviser par $n - 1$ pour prendre en compte que les n données sont liées entre elles par le calcul de m qui est intégré dans la formule du calcul de la variance. Sinon on obtiendrait un résultat « biaisé ». On dit aussi que l'on a perdu un « degré de liberté » classiquement appelé « ddl » et en général représenté par la lettre grecque ν (nu).

Si l'hypothèse de la conformité à la loi de Gauss est juste, cela nous permet de faire des extrapolations intéressantes. Par exemple, nous nous posons la question de savoir quelle est la probabilité de trouver une valeur au-dessus de 16,5 sachant que dans notre histogramme nous n'avons trouvé aucune valeur supérieure à 16,5 :

Nous faisons le transfert $u = \dfrac{x - m}{s}$

avec $x = 16{,}5$; $m = 13$ et $s = 1{,}47$ soit $u = 2{,}38$

La loi de Gauss nous donne alors Pr $[x > 16{,}5] = 0{,}86$ %
Il est remarquable d'apprécier un si faible pourcentage avec seulement 20 valeurs. Bien sûr, ce résultat n'a pas une très grande précision mais donne une indication intéressante.

10.7.2 Le commentaire sur la loi de Gauss

Nous avons dit que la plupart des phénomènes est régie par la loi de Gauss. Ceci s'explique par le fait qu'un résultat x dépend en général d'un très grand nombre de causes dont les effets s'additionnent. Or les statisticiens ont démontré le « théorème central limite » qui dit, en substance, que si l'on additionne

un certain nombre de variables aléatoires respectant des lois quelconques leur somme suit une loi de Gauss, dont la moyenne est la somme de leurs moyennes et la variance la somme de leurs variances à condition que ces variables soient indépendantes. Il faut en principe que le nombre de variables soit supérieur à 5 mais déjà à partir de 3 on est très proche d'une loi de Gauss.

Si une loi n'est pas gaussienne la plupart du temps, il suffit de faire une transformation sur la valeur de x pour obtenir un résultat gaussien. Le plus fréquent est de remplacer x par Log (x).

Mais sans vouloir jouer du paradoxe nous constatons très souvent qu'une distribution ne respecte pas la loi de Gauss. La forme de la distribution est multimodale (*Voir exemple Figure 10.11*). Il s'agit en fait d'un « mélange »[7] de populations gaussiennes mais de moyenne et d'écart type différents. Par exemple dans une production réalisée par plusieurs machines opérant en parallèle on peut imaginer que chacune a sa moyenne et son écart type propre et que les produits étant mélangés cela donne une population multimodale. D'où l'attachement en matière de gestion de la qualité à avoir des lots de production dit « homogène » (dans notre exemple cela veut dire, au moins, qu'un lot homogène provient d'une seule machine parmi plusieurs en parallèle).

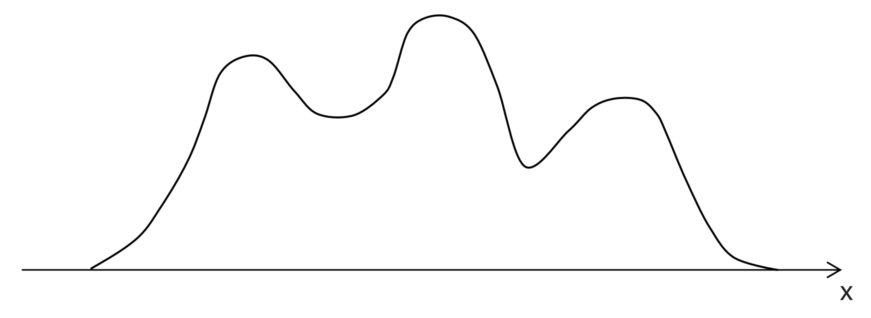


Figure 10.11 Variable multimodale

10.7.3 L'intervalle de confiance de la moyenne

En admettant l'hypothèse que la loi est de Gauss, il est possible de calculer l'intervalle de confiance de la moyenne avec la formule :

$$m - t_{0,95} \times \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < m + t_{0,95} \times \frac{s}{\sqrt{n}}$$

7. Il est important de ne pas confondre l'addition de plusieurs variables x_1, x_2, x_3, … avec le mélange de plusieurs populations correspondant à une seule variable x.

t est une variable de « Student » qui a une forme qui ressemble à la loi de Gauss. C'est également une loi centrée réduite comme pour u (loi de Gauss). $t_{0,95}$ est la valeur de t telle que la probabilité d'être inférieure à t et supérieur à $-t$ est de 0,95. Il n'est pas nécessaire de donner la « table de t » car, comme pour la table de u, une fonction Excel[8] donne pour une probabilité donnée la valeur de t correspondante. Mais il y a une petite complication : la loi de t dépend du nombre de données (indépendantes) de l'écart type soit :

$\nu = (n - 1)$.

Reprenons notre exemple avec $n = 20$ données, $m = 13$ et $s = 1,33$:

la valeur de $t_{0,95}$ est pour $\nu = (n - 1) = 19$ est de 2,09

soit le résultat : $12,38 < \mu < 13,62$

L'expression correcte est « l'intervalle (12,38 à 13,62) a 95 % de chances d'encadrer la moyenne réelle μ ».

10.7.4 La droite de Henry

Une représentation en cumulé de la loi de Gauss a la forme en S, conformément à la Figure 10.12. Il existe un papier à échelle fonctionnelle de Henry. L'échelle est telle qu'une représentation de la loi de Gauss en cumulé devient une droite conformément à la Figure 10.13. Ceci permet en représentant l'histogramme cumulé d'une distribution de fréquence de tester graphiquement la validité de l'hypothèse gaussienne et éventuellement de retrouver des informations telles que la moyenne, l'écart type, une probabilité de trouver une valeur supérieure ou inférieure à une valeur donnée, etc.

Reprenons les 20 données traitées au paragraphe 1.5.1 à partir desquelles nous avions fait un histogramme et calculé au paragraphe 1.7.1 :

- La moyenne : $m = 13,0$;
- L'écart type : $s = 1,33$;
- L'hypothèse gaussienne nous a permis d'estimer que la probabilité de trouver $x > 16,5$ était : 0,86 %.

Le Tableau 10.4 donne le calcul des fréquences cumulées. Le tracé sur le papier de Henry consiste donc à reporter l'histogramme de ces fréquences cumulées sur ce papier. Il est important de noter qu'une fréquence cumulée se rapporte à la **limite supérieure** de classe.

8. La fonction est « LOI.STUDENT.INVERSE ».

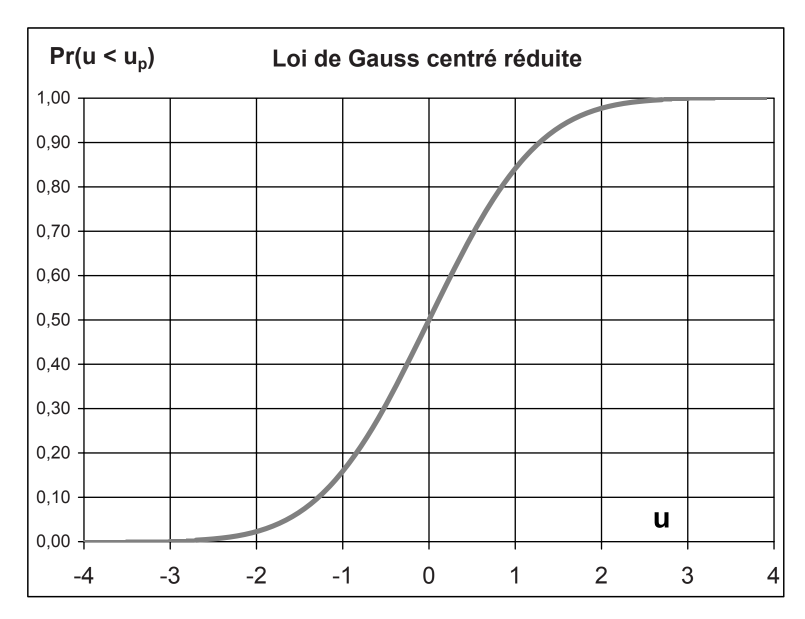


Figure 10.12 Loi de Gauss en cumulé

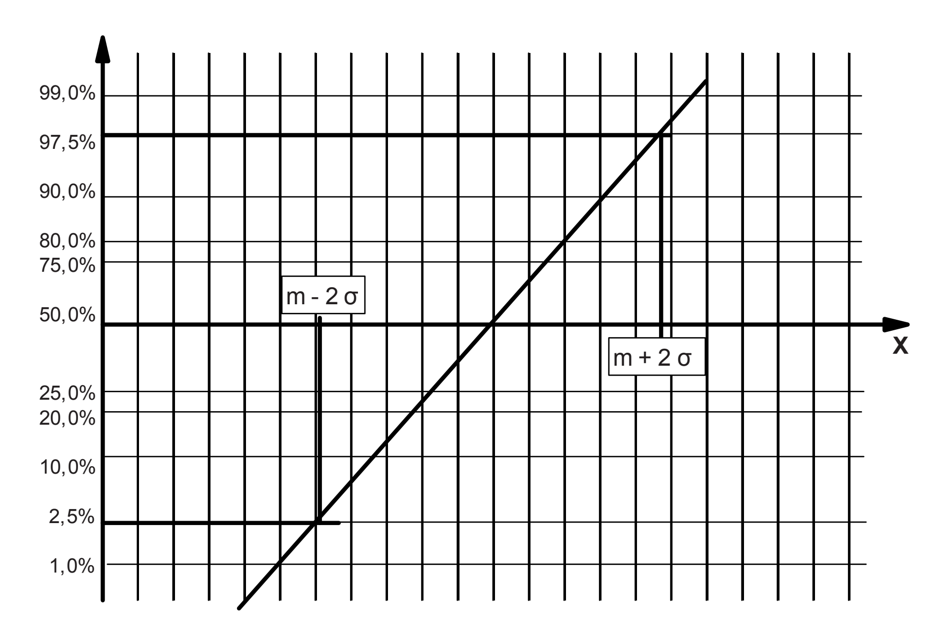


Figure 10.13 Papier de Henry

Tableau 10.4 Histogramme des fréquences cumulées

Limite supérieure d'une classe de x	Fréquence pour la classe x	Fréquence cumulée	Fréquences cumulées en %
10,5	1	1	5 %
11,5	2	3	15 %
12,5	5	8	40 %
13,5	4	12	60 %
14,5	6	18	90 %
15,5	1	19	95 %
16,5	1	20	100 %

Le papier de Henry (*voir la Figure 10.13*) nous permet de faire les observations suivantes :

– Le bon alignement des points nous permet de confirmer l'hypothèse que les données sont conformes à la loi de Gauss. Bien sûr, ce résultat reste subjectif et n'a pas la qualité d'un test d'hypothèse.

– La moyenne qui correspond au point où la probabilité $[x < x_p]$ est de 50 % puisque la loi est symétrique) est $m = 13$ comme pour le calcul.

– L'écart type obtenu en divisant par 4 la plage déterminée par les deux points correspondant à P = 2,5 % et P = 97,5 % soit : $s = \frac{15,65 - 10,30}{4} = 1,33$ comme par le calcul.

– (On rappelle que pour la loi de Gauss la probabilité de se trouver entre $\pm\, 2\,\sigma$ est environ 95 % d'où la division par 4)

– La probabilité que $x > 16,5$ est lue à 0,5 % (au lieu de 0,85 % par le calcul). L'écart se justifie par l'imprécision du tracé).

Nous espérons avoir montré le grand intérêt de la droite de Henry.

Ajoutons que si la loi correspond à un mélange de plusieurs populations gaussiennes, le papier met bien en évidence plusieurs droites correspondant à chacune des sous-populations.

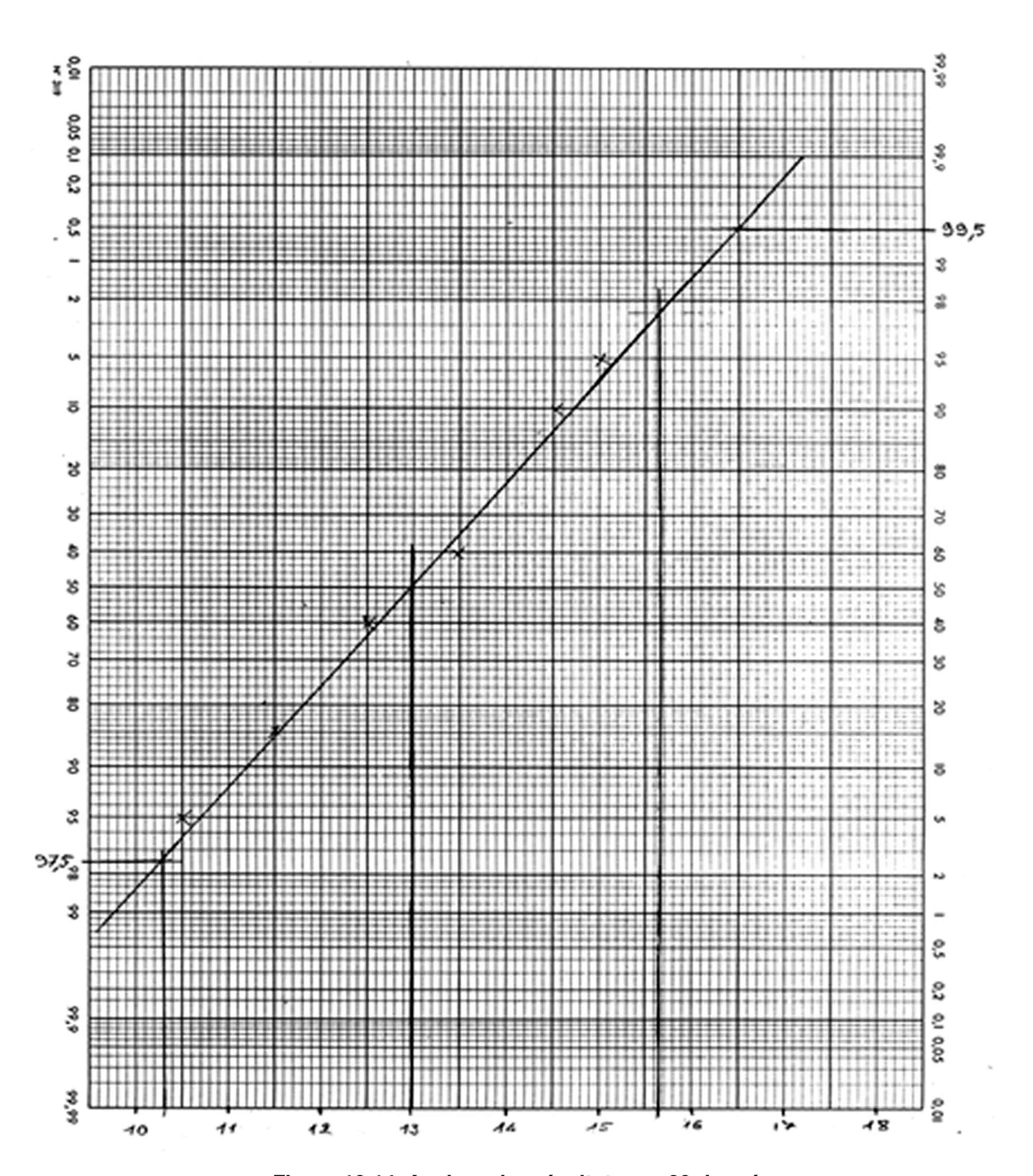


Figure 10.14 Analyse des résultats sur 20 données à l'aide du papier de Henry

10.7.5 L'intervalle de Confiance d'une proportion

Dans un échantillon d'effectif *n* on a trouvé *k* « individus » correspondant à un critère donné.

Par exemple :

– *k* défauts sur n produits ;

– *k* personnes satisfaites dans un sondage sur *n* interrogées.

Le rapport $f = k/n$ est une estimation de la proportion *p* dans la population La quantité k suit une « loi binomiale ». Cette propriété permet de construire l'abaque suivant qui donne l'intervalle de confiance d'une proportion pour un résultat $f = k/n$ source (source CERESTA) :

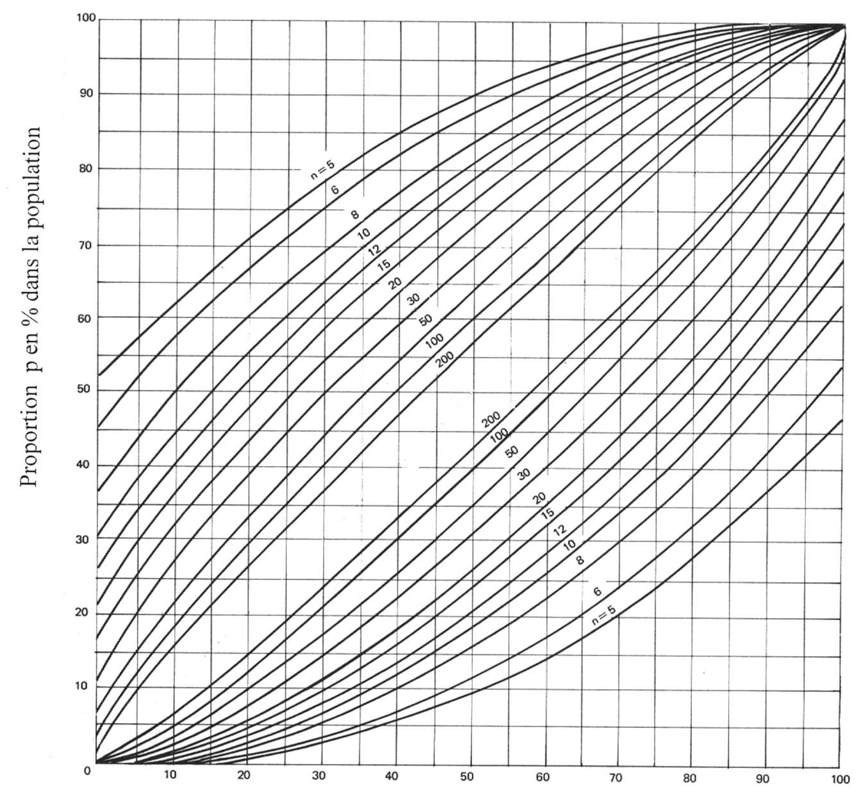


Figure 10.15 Abaque de l'intervalle de confiance bilatéral d'une proportion p au seuil de confiance à 95 %

Pour trouver l'intervalle de confiance il suffit de tracer une droite verticale à partir de la proportion expérimentale f et de noter les valeurs de p correspondant aux intersections avec les courbes correspondant à la valeur de n.

Par exemple pour $k = 20$ et $f = 100$ on trouve les valeurs de p : 12 % et 29 %. Cas où $n > 200$.

On voit que l'abaque se limite à $n = 200$. Or à partir de $n > 200$ la loi binomiale tend vers une loi de Gauss d'écart type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{p\,(1-p)}{n}}$$

et comme p est inconnu on en prend son estimation :

$$s = \sqrt{\frac{f(1-f)}{n}}$$

Partant du fait que pour une variable qui suit la loi de Gauss il y a une probabilité d'environ 95 % que le résultat se trouve dans un intervalle de ± 2 s, on estimera l'intervalle de confiance par :

$$p = f \pm 2 = \sqrt{\frac{f(1-f)}{n}}$$

- **Indépendance de N taille de la population**

L'échantillonnage a été fait en général à partir d'une population formée de N individus. Or, il est remarquable de noter que l'intervalle de confiance ne fait aucune référence à la quantité N. Cela veut dire, par exemple, que si l'on veut faire un sondage auprès d'une population et si l'on souhaite avoir un résultat avec une certaine précision (matérialisée par l'intervalle de confiance) il n'y a pas lieu de prévoir un échantillonnage d'autant plus important que la population est plus grande ! Qu'elle soit de 1000, 10 000, ou 1 million de personnes, cela ne change rien. En revanche, il est naturel de s'imposer un intervalle de confiance plus réduit lorsque N croit donc d'augmenter n car les conséquences d'une décision sont d'autant plus graves que N est grand. Se tromper sur une décision pour un lot de 1 000 produits est moins grave que pour un lot de 100 000 produits. Ce qui revient à faire le choix d'une taille d'échantillonnage n plus grande lorsque N croît[9].

9. Nous verrons une application de ce principe dans le chapitre des contrôles par échantillonnage.

● Non-exhaustivité

Cependant, l'indépendance de N sur l'intervalle de confiance suppose une condition qui est que l'échantillonnage ne soit pas « exhaustif », autrement dit que, par exemple, si l'on prélève *n* pièces dans un lot de N on considère que la population n'est pas sensiblement modifiée par le prélèvement de ces pièces[10] ; ce qui est pratiquement toujours le cas. Cette condition est quasiment satisfaite tant que $N > 10 \times n$.

● Importance de l'intervalle de confiance

Nous attirons l'attention sur le fait que les intervalles de confiance d'une proportion sont très larges et qu'il faut en conséquence prendre des valeurs de *n* très grandes. Nous sommes en face d'un véritable problème car souvent ce n'est matériellement par réaliste. Il est cependant très souvent possible de contourner cette difficulté. Il faut transformer le problème en remplaçant la variable par attribut par une variable mesurable. Nous avons vu que le calcul d'une moyenne sur des quantités assez réduites donnait un résultat avec un intervalle de confiance assez étroit.

Prenons quelques exemples :

Si dans un sondage nous posons la question : « êtes-vous satisfait ? » : réponse oui ou non, il nous faudra interroger beaucoup de personnes ; mais si nous posons la question : évaluer sur une échelle de 1 à 10 votre degré de satisfaction on obtiendra une information bien meilleure avec peu de personnes.

Si sur un produit nous voulons évaluer la proportion de produits qui ne respectent pas un certain seuil de résistance à la rupture, il nous faudra un nombre important de produits, ce qui risque de coûter très cher ; mais si nous mesurons la valeur pour laquelle chacun des produits atteint la rupture, la distribution statistique des résultats nous donnera avec un nombre de produits réduit une information bien plus précise sur le niveau de qualité. Avec l'hypothèse d'une loi de Gauss nous pourrons même estimer la proportion de produits qui ne respectent pas le seuil fixé.

Si la sécurité dans une entreprise est évaluée à partir de la proportion d'accidents graves l'indicateur mériterait d'être complété d'un autre donnant la moyenne de l'histogramme des accidents classés sur une échelle des gravités allant du petit accident mineur à l'accident grave. Plus le nombre de classes sera élevé plus l'indicateur donnera une évaluation précise et utile.

---

10. Le cas extrême où $n = N$ montre à l'évidence que le calcul de l'intervalle de confiance tel que nous l'avons fait n'a plus de sens. Mais il reprend tout son sens si on s'intéresse uniquement à la loi, N pouvant être considéré comme le prélèvement.

En conclusion, l'abaque de l'intervalle de confiance d'une proportion nous montre qu'il faut éviter à tout prix l'usage des proportions !

10.7.6 L'intervalle de confiance d'une quantité

Nous nous intéressons comme pour la loi Binomiale à une variable aléatoire *k* qui est un nombre, une quantité mais qui ne se réfère pas à une quantité *n*.

Voici quelques exemples :

- Nombre de personnes dans une file d'attente
- Nombre de véhicules passant toutes les minutes
- Nombre de défauts par m^2 sur un tissu

Lorsque l'on est dans un processus aléatoire ce nombre *k* suit une loi de Poisson qui a pour caractéristique :

- Moyenne = m
- Écart type = $\sqrt{m}$
- Forme dissymétrique

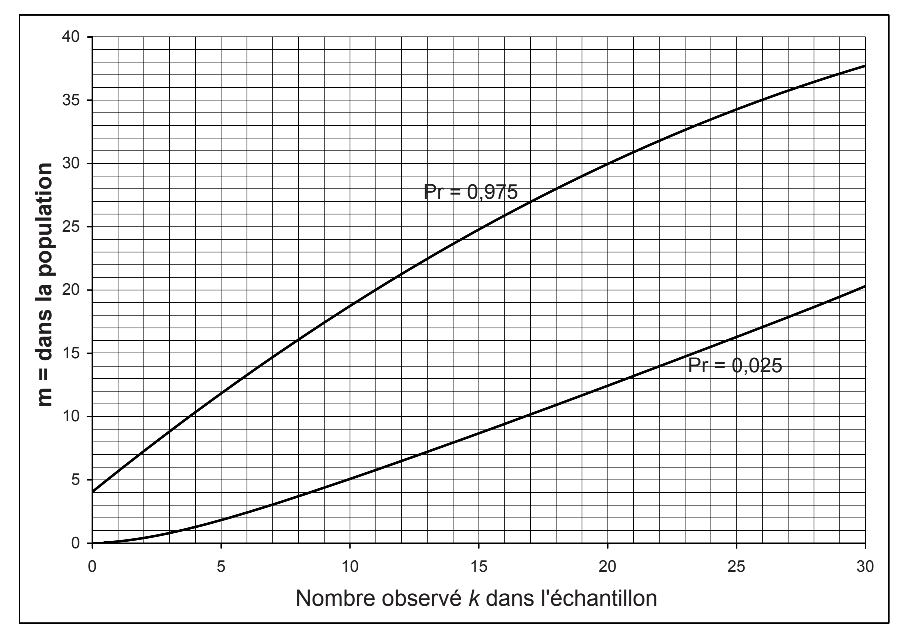


Figure 10.16 Estimation l'intervalle de confiance de la moyenne *m* d'une quantité *k* qui suit une loi de Poisson

L'intervalle de confiance se calcule à partir de la loi de Poisson mais nous disposons d'un abaque présenté ci-dessous (*Figure 10.16*) pour un seuil de confiance à 95 %.

Pour trouver l'intervalle confiance il suffit de tracer une droite verticale à partir de la quantité expérimentale k et de noter les valeurs de m correspondant aux intersections avec les courbes.

Par exemple pour $k = 20$ on trouve $12{,}2 < m < 30$.

10.7.7 Le commentaire sur l'intervalle de confiance ou le seuil de confiance

Lorsque l'on fait un rapport sur une étude il est difficile d'exprimer systématiquement les intervalles de confiance ou les seuils de confiance. Il faut le faire sur les points essentiels.

Mais surtout un intervalle de confiance se détermine avant de faire un échantillonnage afin de s'assurer que la taille de l'échantillon sera suffisante. Ceci ne pose pas de problème lorsque l'on a un ordre de grandeur de la valeur à estimer.

Notons que, nous l'avons vu à différentes reprises, les intervalles de confiances sont souvent proportionnels à $\sqrt{n}$. Ce qui veut dire par exemple que pour diviser par deux un intervalle de confiance il faut multiplier par quatre la taille de l'échantillonnage.

10.7.8 La régression

- **La régression linéaire**

Nous avons recueilli pour un ensemble d'individus ou de produits une valeur x et une valeur y. On pourra se reporter au tableau de résultats expérimentaux du paragraphe 1.6.6 pour sélectionner une colonne y et une colonne x.

Nous voudrions vérifier si y dépend de x selon une relation linéaire. C'est le principe de la régression linéaire.

Le modèle mathématique est : $y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$

β_0 et β_1 sont les coefficients de la droite qu'il nous faut estimer. Le principe de l'estimation est celui de la droite des moindres carrés. Prenons une droite quelconque passant au milieu des points et pour chacun des points la droite verticale passant par ce point ; considérons pour chacun d'eux le long de cette

verticale la distance du point à la droite. La droite de régression est celle pour laquelle la somme des carrés de ces distances est minimum[11].

ε est une variable aléatoire qui se superpose à la droite et pour laquelle on fait l'hypothèse qu'elle suit une loi de Gauss. On évalue alors l'écart type de cette variable.

On peut compléter les estimations d'un test d'hypothèse sur la linéarité de la régression et un autre sur la validité statistique de la droite.

Nous n'abordons pas l'aspect mathématique mais nous signalons que le tableur Excel, lorsque l'on fait un graphique *y* fonction de *x* en étudie la régression sous la forme d'une droite de tendance à laquelle il affecte les coefficients b_0 et b_1.

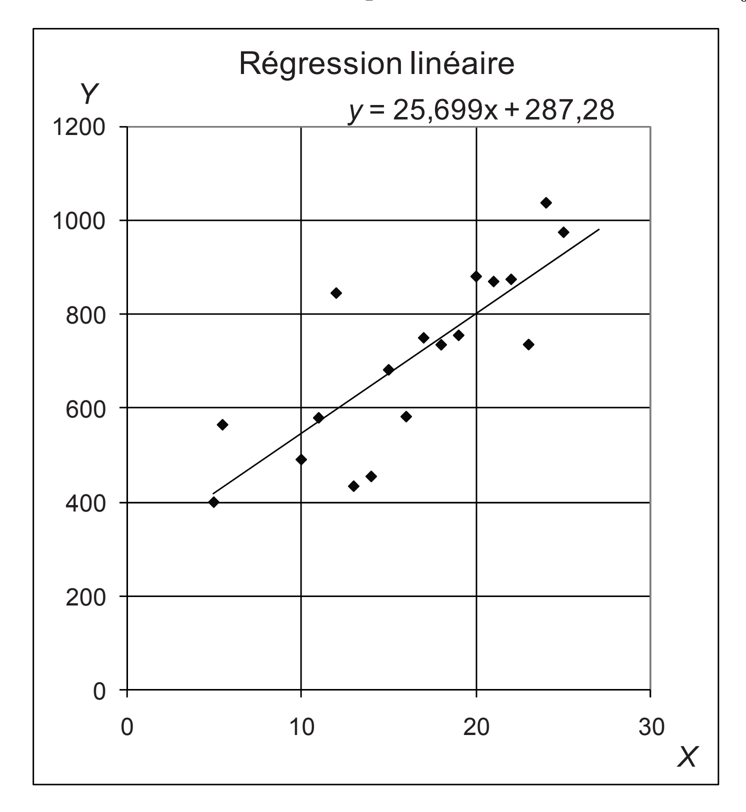


Figure 10.17 Droite de régression avec estimation des coefficients de la droite

11. On peut faire un parallèle avec une variance d'une variable *x* : la moyenne est le point des moindres carrés.

● La multirégression linéaire

Il s'agit d'une généralisation de la régression linéaire au cas de plusieurs variables x_i. C'est de notre point de vue une méthode des plus intéressantes. Mais elle fait appel à des outils statistiques que nous ne pouvons pas développer ici. Le modèle mathématique est :

$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \ldots + \varepsilon$

Les estimations en sont faites à partir de calculs complexes (inversion de matrices)[12].

● La régression polynomiale

Il s'agit d'une régression sur une variable *x* répondant au modèle suivant :

$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 \ldots + \varepsilon$

Cette méthode est très intéressante car n'ayant aucune idée sur la loi $y = f(x)$, pratiquement on trouvera toujours une fonction polynomiale ajustant les résultats expérimentaux. Là encore Excel propose lors d'une présentation graphique de *y* en fonction de *x* une courbe de tendance avec calcul des coefficients.

10.7.9 L'analyse de la variance à une dimension

Reprenons nos données du paragraphe 1.6.4. Nous sommes dans un cas particulier d'une « régression » où y est fonction d'une variable discrète A qui prend les « modalités » *i* allant de 1 à I : $A_1, A_2 \ldots A_i, \ldots A_I$. Dans notre exemple I = 4. Et le nombre de valeurs par groupe est R = 6.

A_1	A_2	A_3	A_4
96,5	92,4	102,9	106,8
98,9	94,7	103,3	105,8
103,6	97,5	104,1	108,6
102,9	100,9	104,2	104,9
104,6	95,3	106,5	114,3
103,0	96,4	102,7	111,7

12. Les inversions de matrices risquant de porter sur des matrices singulières donc impossibles à calculer il faut opter alors pour une regression dite « pas à pas ».

Le modèle mathématique supposé est :

$y = \mu + \alpha_i + \varepsilon$ avec :

- μ : la moyenne générale ;
- α_i : une valeur en plus ou en moins qui va affecter les données du groupe correspondant à la modalité i. On les choisit arbitrairement telles que : $\Sigma\alpha_i = 0$;
- ε : une variable aléatoire qui suit une loi de Gauss de moyenne = 0 et d'écart type σ_r. On suppose donc que l'écart type est le même pour chacun des I groupes de données. Il est d'usage de le noter avec un indice r car on l'appelle en général **l'écart type résiduel** et sa variance **la variance résiduelle**. Estimation des paramètres du modèle mathématique.

Les estimations sont notées :

- m pour μ ;
- a_i pour α_i estimation à laquelle on peut associer un intervalle de confiance en utilisant la méthode de calcul présentée au paragraphe 1.7.3 ;
- s_r pour σ_r.

avec :

- m = moyenne générale de toutes les données = 102,6 ;
- a_1 = (moyenne du groupe A_1) – m = 101,6 – 102,6 = – 1,0 (IC : – 2,4 à 0,3) ;
- a_2 = (moyenne du groupe A_2) – m = 96,2 – 102,6 = – 6,4 (IC : – 7,8 à – 5,1) ;
- a_3 = (moyenne du groupe A_3) – m = 103,9 – 102,6 = + 1,3 (IC : 0,0 à 2,7) ;
- a_4 = (moyenne du groupe A_3) – m = 108,7 – 102,6 = + 6,1 (IC : 4,7 à 7,4) (on vérifie bien que $\Sigma a_i = 0$) ;
- s_r^2 = moyenne des variances de chacun des groupes = 8,4 et s_r = 2,9 ;
- avec ν_r = I (R-1) = 20 ddl.

Le graphique suivant représente les valeurs a_i avec leur intervalle de confiance.

Il nous reste à calculer l'écart-type résiduel : nous l'obtenons à partir du calcul du test de l'analyse de la variance suivant.

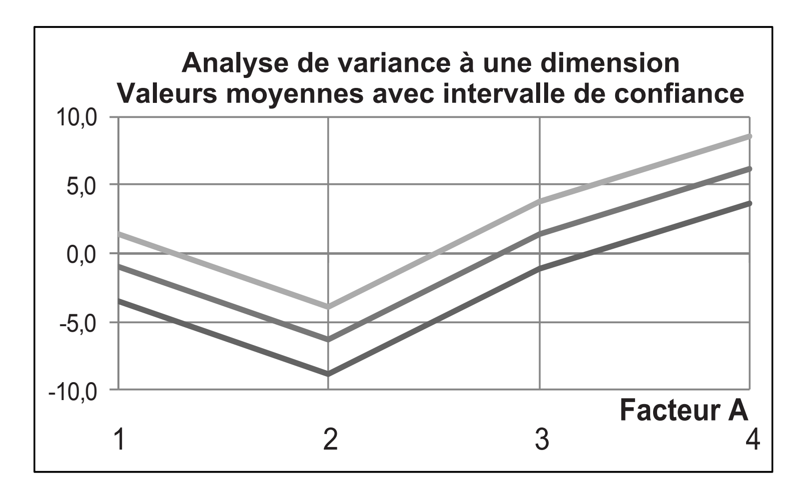


Figure 10.18 Estimation du modèle mathématique y = f (A)

● Test de l'analyse de la variance

Ce test est d'une grande utilité car si dans notre exemple il paraît graphiquement assez clair que le facteur A a une influence, souvent ce n'est pas si évident ; on procède alors au « test d'hypothèse ». L'hypothèse dite H_0 est que le facteur A n'a pas d'influence, c'est-à-dire que : $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$.

Ce test se réalise à partir du tableau dit « d'analyse de la variance »[13].

On associe, conformément au tableau 10.5, au facteur A, à la résiduelle, et à la totalité des données respectivement :

– une somme de carrés ;
– un degré de liberté (ddl) qui correspond au nombre de données indépendantes de la somme des carré ;
– le carré moyen qui est en fait une variance.

Ce tableau présente une caractéristique qui est que les sommes quadratiques de A et de la résiduelle s'additionnent pour donner la somme quadratique totale, de même pour les ddl. Ceci nous dispense d'écrire la somme quadratique de la résiduelle qui est un peu compliquée et que l'on peut donc obtenir par différence.

13. Ce nom peut prêter à confusion car il s'agit bien de tester une variation de moyennes. Mais il s'appuie sur un calcul de variances.

Tableau 10.5 Tableau d'analyse de la variance

Origine	Somme des carrés (quadratique)	Degré de liberté (ddl)	Carré moyen
Facteur A	$Q_a = R. \Sigma a_i^2$	$\nu_a = I - 1$	$S_a^2 = Q_a/(I - 1)$
Résiduelle	$Q_r = Q_t - Q_a$	$\nu_r = N - I$	$S_r^2 = Q_r/\nu_r$
Total	$Q_t = \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2/N$	$\nu_t = N - 1$	$S_t^2 = Q_t/(N - 1)$

Dans l'hypothèse $H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$, le rapport S_a^2/S_r^2 est une variable aléatoire suit une loi de probabilité F de Snedecor à condition que les résultats « y » suivent une loi de Gauss pour chacun des groupes de données, or cela était une de nos hypothèses de départ. Sans entrer dans la théorie, F est une variable aléatoire qui va de 0 à l'infini avec une forme dissymétrique. La loi de F est fonction des ddl des deux variances S_a^2 et S_r^2. Si l'on veut que notre test soit à un seuil de confiance de 95 % on cherche dans la table de Snedecor la valeur de $F_{0,95}$ pour laquelle la probabilité d'être inférieure à cette valeur est de 95 %, et bien sûr la probabilité d'être supérieure est alors de 5 %. Si la valeur de $F = S_a^2/S_r^2$ expérimentale est supérieure à ce seuil on dit que les résultats ne sont pas compatibles avec l'hypothèse H_0, donc on admettra que **les moyennes sont statistiquement différentes**. Là encore, nous pensons inutile de donner la table de F puisque Excel propose une fonction permettant de trouver la valeur de F pour un seuil de confiance choisi et les ddl correspondants que l'on trouve dans le tableau d'analyse de la variance.

Dans notre exemple, nous trouvons : F expérimental = 19,27 pour, selon la table, un $F_{0,95} = 3,10$; ce qui correspond à une très grande significativité de la variation des moyennes.

Tableau 10.6 Tableau d'analyse de la variance de calcul

Origine	Somme quadratique		ddl		Carré moyen		F
Facteur A	Q_A	= 484,9	I – 1 =	3	Sa² =	161,6	19,27
Résiduelle	Q_R	= 167,8	N – I =	20	Sr² =	8,4	
Total	Q_T	= 652,7	N – 1 =	23	St² =	28,38	
					F (0,95) $_{table}$		3,10

10.7.10 Généralisation de l'analyse de la variance

On généralise au cas où y est fonction de plusieurs facteurs discrets. Mais dans ce cas il nous faut prendre en compte en plus les interactions entre les facteurs :

$$y = f(A, B, C,\ldots AB, AC, BC\ldots)$$

Nous ne l'abordons pas ici car nous traitons ce cas à l'occasion des plans d'expériences d'une part, et de la mesure de la reproductibilité des systèmes de mesure d'autre part (*voir les chapitres traitant de ces deux sujets*).

10.8 Points aberrants

Lorsque l'on relève des données de quelque nature qu'elles soient, il faut s'assurer de leur validité.

Prenons l'exemple d'une série de valeurs relatives à une variable continue allant de 13 à 18. Un point aberrant est le cas d'une valeur « hors norme » par exemple 30. Cette donnée peut correspondre à :

- une valeur mal notée ;
- une erreur de communication ou transmission informatique.

Mais peut-être une donnée correcte correspondant à un cas particulier, un produit accidenté, une personne malade, etc.

Ces points doivent être détectés **pour les extraire du fichier de données** car ils risquent de fausser tous les calculs et leurs interprétations. Or, ce n'est pas toujours facile car souvent, notamment pour des données relevées automatiquement dans des systèmes informatiques, on n'en a pas une visibilité naturelle.

En revanche, ces points doivent faire l'objet d'un traitement à part, car ils peuvent avoir une importance primordiale.

10.9 Échantillonnage représentatif

10.9.1 Principes

Revenons sur ce point dont nous avons déjà parlé dans le chapitre 7 sur le contrôle des produits dans l'industrie.

Qu'il s'agisse d'un sondage auprès de personnes ou d'un échantillonnage de produits, il faut que ceux-ci soient représentatifs. La difficulté est que la population n'est en général pas homogène.

Les personnes peuvent appartenir à des catégories différentes sur le plan social, professionnel, âge, lieu d'habitation, etc. Il y a un risque de choisir inconsciemment ou même volontairement des personnes d'une catégorie au détriment d'une autre.

Les produits peuvent avoir été fabriqués dans des conditions différentes. Les critères d'hétérogénéité peuvent être la machine de production, le lot de matière utilisé, la personne affectée au poste de travail… Il y a un risque à ne prélever les produits provenant que d'une seule machine ou fabriquée par une seule personne…

Pour obtenir un échantillonnage représentatif, il y a deux solutions :

– le tirage au hasard ;
– la stratification (ou segmentation).

10.9.2 Tirage au hasard

Le principe est très simple, il faut que chaque individu (personnes ou produit) ait la même probabilité de faire partie de l'échantillonnage. Une solution est de leur donner un numéro et d'utiliser une table de « nombres au hasard ». Il est plus simple d'utiliser la fonction « aléa » d'Excel pour faire une liste de nombres au hasard.

Mais, dans la pratique, l'application de ce principe peut être très difficile voire impossible. Comment répartir les prélèvements dans une boîte de pièces où seules sont accessibles celles du dessus ? Comment prélever un morceau de fil dans une bobine ou un morceau de métal dans un rouleau ?

Comment identifier l'ensemble des clients dans la vente de produits grand public ?

10.9.3 Stratification ou segmentation

Pour pallier cette difficulté, on emploie souvent une technique dite « de stratification ou segmentation ». Cela consiste à déterminer les différentes caractéristiques de la population qui pourrait justifier des résultats différents.

On s'efforce alors de construire un échantillon d'individus dans lequel les sous-populations répondant aux différents critères d'hétérogénéité sont représentées dans les mêmes proportions que dans la population globale.

10.9.4 Aspect psychologique

Il faut que celui qui fait l'échantillonnage reste neutre.

S'agissant des personnes, si elles sont consultées directement au cours d'un dialogue, il faut veiller à rester très neutre sans essayer de quelque façon que ce soit d'influencer la réponse.

S'agissant de produit, il peut y avoir un risque de prélever des produits à l'aspect douteux ou inversement. Faisant une mesure sur un produit, l'opérateur peut avoir tendance à biaiser légèrement un résultat dans un sens favorable ou au contraire défavorable.

11

Les plans d'expériences

11.1 Principes et calculs

11.1.1 Objectifs

L'objectif des plans d'expériences est de déterminer l'influence sur un résultat :

– de plusieurs facteurs ;
– de leurs interactions ;
– avec un minimum d'expériences ;
– avec la meilleure précision possible.

Cette connaissance permet, par exemple dans le domaine industriel, d'optimiser la conception d'un produit, d'améliorer la qualité des produits en production ou la performance des moyens de production.

11.1.2 Exemple

Nous prendrons tout le long de cette présentation l'exemple d'un modèle de rétroprojecteur dont les études en clientèle ont montré un taux de pannes

excessivement fort du fait d'une température trop élevée à l'intérieur des appareils. Une étude est entreprise pour déterminer les facteurs susceptibles de jouer sur la température afin d'y remédier.

11.1.3 Définitions

- **Le résultat, l'effet ou la réponse**

Nous nommons Y le résultat parfois appelé l'effet ou la réponse. Y doit être mesurable. Dans notre exemple, Y est la température à l'intérieur de l'appareil.

- **Facteurs**

Nous nommons les facteurs A, B, C… Ils peuvent être mesurables (quantitatifs) ou non mesurables (qualitatifs).

Pour simplifier, considérons dans un premier temps seulement deux facteurs, sachant que cet exemple sera généralisé ensuite au cas de nombreux facteurs.

Exemple

À : la vitesse de rotation du ventilateur (facteur mesurable)

B : La forme des ouvertures d'aération (facteur non mesurable).

- **Niveau des facteurs**

Un facteur peut prendre plusieurs niveaux (ou modalités).

Exemple

Facteur A : A_1, A_2,… A_i,… A_I chaque niveau étant identifié par un indice i allant de 1 à I.

Facteur B : B_1, B_2,… B_j,… B_J chaque niveau étant identifié par un indice i allant de 1 à J.

- **Interaction**

Distinguons l'effet sur Y :

– des différents niveaux A_i

– des différents niveaux B_j

– d'une combinaison de niveaux A_iB_j

L'effet sur Y de la combinaison A_iB_j est ce que l'on appelle une interaction.

11.1.4 Représentation graphique

Examinons le graphique suivant (*Figure 11.1*). Nous identifions bien :

– L'effet de A qui fait augmenter la température Y de 2 °C lorsque l'on passe de A_1 à A_2 et encore de 2 °C lorsque l'on passe de A_2 à A_3 et ceci quel que soit B.

– L'effet de B qui fait augmenter la température Y de 2 °C lorsque l'on passe de B_1 à B_2 et ceci quel que soit A.

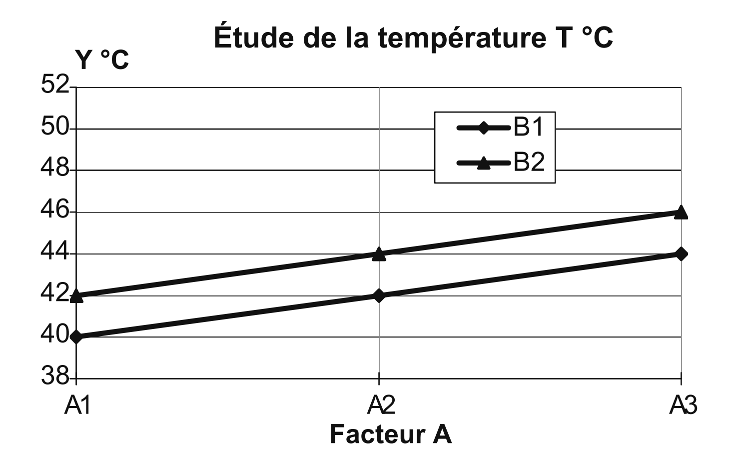


Figure 11.1 Graphique sans interaction

Examinons maintenant le graphique suivant (*Figure 11.2*).

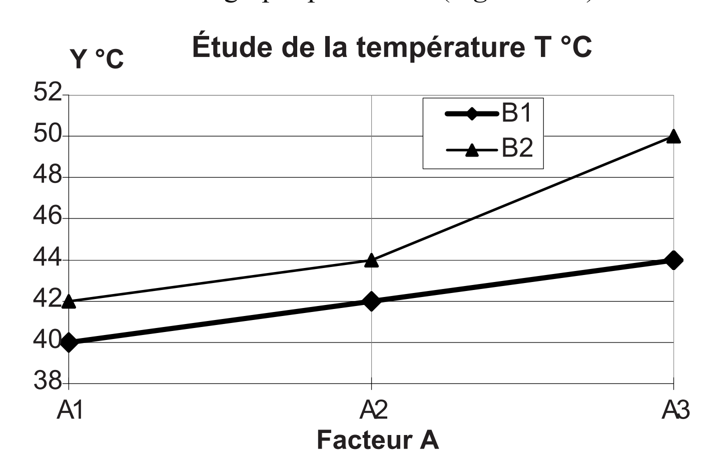


Figure 11.2 Graphique avec interaction

Les deux graphiques présentent les mêmes résultats exceptée la combinaison A_3B_2 pour laquelle une augmentation de la température complémentaire de 4 °C est observée.

Autrement dit, la température change en fonction de A (la vitesse de rotation du ventilateur), en fonction de B (la forme des ouvertures d'aération) mais aussi en fonction de la combinaison A_3B_2. Ceci signifie que pour cette vitesse du ventilateur A_3, la forme B_2 renforce encore la température d'une façon particulièrement importante. Il y a donc une interaction pour A_3B_2. Bien sûr, il peut y avoir des interactions pour plusieurs combinaisons A_iB_j.

11.1.5 Modèle

Dans la pratique, les choses ne sont pas si simples. Les résultats sont « pollués » par de nombreux facteurs non maîtrisés au cours des expériences. À chaque résultat d'une expérience s'ajoute une composante aléatoire qui, par hypothèse, suit une loi de Gauss, de moyenne nulle et d'écart type sr supposé constant. Nous appelons également ce bruit la « résiduelle ». Nous adoptons l'écriture suivante :

- $Y = m + a_i + b_j + a_ib_j + e$
- m : moyenne générale
- a_i : effet de A_i sur Y
- b_j : effet de B_j sur Y
- a_ib_j : interaction de A_iB_j sur Y
- e : variable aléatoire (résiduelle) suivant une loi de Gauss (moyenne : 0, écart type résiduel : s_r)

  en notant bien que a_ib_j n'est pas un produit mais l'expression de l'effet de l'interaction A_iB_j sur Y.

11.1.6 Expériences selon la méthode traditionnelle

La méthode dite traditionnelle consiste à réaliser des expériences en faisant varier chaque facteur un par un, tous les autres étant fixés sur une position moyenne (« toutes choses égales par ailleurs »).

11.1.7 Méthodes des plans d'expériences

La méthode consiste à faire une sélection optimisée parmi les différentes combinaisons possibles de tous les niveaux des différents facteurs. Le graphique de

Figure 11.3 montre l'ensemble des combinaisons possibles A_i x B_j qui pourraient faire l'objet d'une expérience. Nous verrons plus loin comment déterminer cette sélection d'expériences.

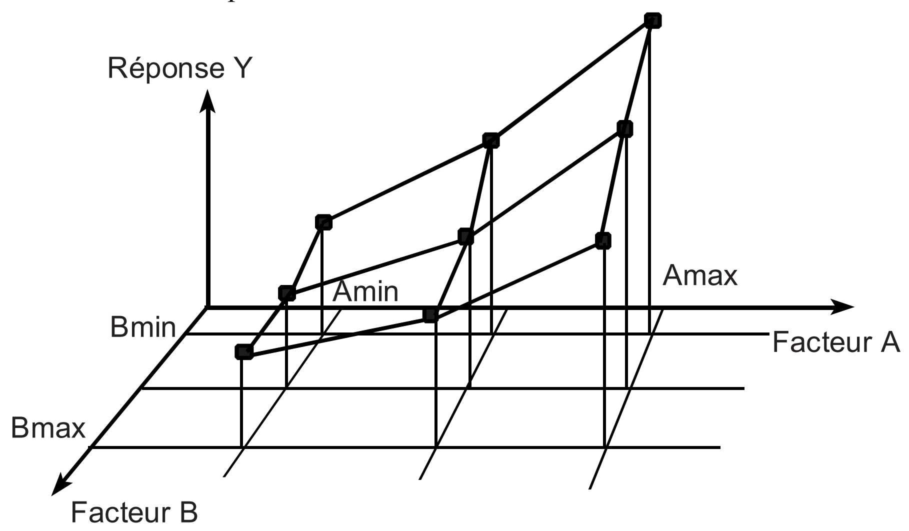


Figure 11.3 Méthode des plans d'expériences

Par rapport à la méthode traditionnelle et paradoxalement, cette méthode :

– nécessite un nombre d'essais nettement plus réduit ;
– est cependant beaucoup plus « précise », c'est-à-dire qu'en langage statistique elle donne des résultats beaucoup plus significatifs ;
– permet de déterminer les interactions.

11.2 Organisation du plan

Réaliser un plan d'expériences implique d'adopter une démarche rigoureuse dont voici les principales étapes.

11.2.1 Définition du problème

Il s'agit d'abord de bien définir le problème et de fixer l'objectif. Dans l'exemple retenu, cela consiste, d'une part, à déterminer les facteurs susceptibles de jouer sur la température et, d'autre part, à définir leur importance afin de la réduire et ainsi améliorer la fiabilité. Le but est d'obtenir un gain d'au moins 5 °C.

11.2.2 Mise en place d'une organisation

Un plan d'expériences est un travail conséquent qui se fait maintenant le plus souvent en groupe de travail. Cela implique d'avoir au préalable un accord et un soutien de la hiérarchie, de bien définir le groupe, de fixer un planning et des moyens.

11.2.3 Analyse des données disponibles

Cette étape consiste à rechercher les expériences antérieures, les études déjà réalisées, les documents traitant de tels problèmes… et à consulter les spécialistes.

11.2.4 Identification des contraintes

La conduite du plan peut être perturbée par des contraintes à identifier dès le début.

– Contraintes économiques : par exemple, certains facteurs seraient trop coûteux à modifier.
– Contraintes physiques : par exemple, certaines associations de facteurs sont impossibles à réaliser ou certains facteurs sont difficiles à faire varier.

11.2.5 Choix des facteurs et interactions à étudier

Une recherche en groupe avec les personnes concernées permet de déterminer les facteurs et interactions soupçonnés d'avoir une influence. Pour cela, la technique du « *brainstorming* » et la représentation des réponses sur un diagramme « causes-effet » peuvent être adoptées. Il est fréquent d'obtenir une première liste de plusieurs dizaines de facteurs. Afin de ne pas être confronté à un problème de gestion, il est raisonnable de se limiter à un nombre maximum de 15 à 20 facteurs, ce qui est déjà important.

Considérons que ce travail de préparation a abouti à la sélection des facteurs et des interactions et au choix des niveaux suivants.

Exemple

A Forme ailettes du ventilateur	A_1 forme n° 1
	A_2 forme n° 2
B Position du ventilateur	B_1 en haut
	B_2 en bas

C Forme des ouvertures		C_1 simple
		C_2 avec courbures
D Largeur des ouvertures		D_1 2 mm
		D_2 3 mm
AB	Interaction « Forme ailettes du ventilateur » × « Position du ventilateur »	
BC	Interaction « Forme des ouvertures » × « Position du ventilateur ».	

Lors de la réalisation du plan d'expériences, les autres facteurs, non pris en compte mais identifiés et maîtrisables, devront être bien figés.

Pour les besoins de l'exposé, seul un nombre limité de facteurs et d'interactions ont été pris en compte.

De même pour les facteurs seuls deux niveaux ont été retenus. Cette façon de faire est très fréquente car elle peut suffire, au moins dans un premier temps. Des plans complémentaires peuvent être faits par la suite avec plus de niveaux.

11.2.6 Recherche d'un plan

● **Plans orthogonaux**

La grande caractéristique des plans d'expériences est d'utiliser des plans « orthogonaux ». Examinons le plan présenté plus loin à titre d'exemple (*Tableau 11.1*). Chaque ligne décrit une expérience (ou essai) et chaque colonne les niveaux pris par chaque facteur. Par exemple, l'expérience n° 4 est faite avec le facteur B au niveau 2. Si nous considérons une colonne comme un vecteur, dans un plan orthogonal, tous les vecteurs sont orthogonaux deux à deux. Sans entrer dans les considérations mathématiques, un simple examen montre une certaine logique dans l'élaboration d'un tel plan.

● **Choix d'un plan**

Les méthodes de recherche ne sont pas abordées ici. Citons cependant trois méthodes :

– **Les plans factoriels.** Ils consistent à prendre toutes les combinaisons possibles des niveaux des différents facteurs. Ces plans sont très chers et à éviter.
– **Les plans fractionnaires déterminés par la méthode de BOX et Hunter.** Ces plans traitent des facteurs à deux niveaux.

– **Les plans fractionnaires déterminés par la méthode des graphes linéaires de Taguchi.** Cette méthode permet de construire également des plans à plus de deux niveaux.

Le problème tient au fait que chaque plan à traiter est un cas particulier. Il existe de nombreux plans tout faits qui ne correspondent pas nécessairement à notre problème. D'une façon générale, il existe des plans tout faits non adaptables ou des plans (que l'on peut considérer comme des tables) qu'il est possible de transformer pour les adapter à un problème spécifique.

Dans l'exemple présenté ci-dessus, la méthode des graphes linéaires de Taguchi a conduit à mener des expériences selon le programme défini au tableau 11.1.

Tableau 11.1 Le plan et ses résultats

	Ailettes	Position ventilateur	Forme ouvertures	Largeur ouvertures	Température
	A	**B**	**C**	**D**	**Résultats**
Essai 1	1	1	1	1	50,8
Essai 2	1	1	2	2	55,0
Essai 3	1	2	1	2	58,2
Essai 4	1	2	2	1	57,6
Essai 5	2	1	1	2	54,3
Essai 6	2	1	2	1	52,7
Essai 7	2	2	1	1	53,2
Essai 8	2	2	2	2	58,2

Il faut noter que chaque expérience peut être répétée un nombre constant de fois R que l'on nomme la répétition. Cela augmente la précision des résultats.

11.2.7 Mise en œuvre du plan

Une seule erreur dans la réalisation du plan peut réduire à néant l'ensemble des résultats. Il faut donc le réaliser avec beaucoup de méthode et de rigueur et, pour cela, en déterminer l'organisation. Avec quelles personnes ? Sur quels équipements ? À quel moment ? etc.

11.2.8 Calculs

Les formules suivantes sont utilisées :

– Estimation de la moyenne générale m : m = ΣY/N (N : nombre total d'expériences)

– Estimation de l'effet a_i : a_i = (Moyenne de Y pour la modalité A_i) – m

  Même principe pour b_j, c_k, etc.

– Estimation de l'interaction a_ib_j : a_ib_j = (Moyenne de Y pour chaque combinaison A_iB_j) – m – a_i – b_j

  Même principe pour b_jc_k, etc.

Les calculs se réduisent à des calculs de moyennes. Il est très important de noter que cela s'explique par la spécificité des plans d'expériences qui se basent sur des plans orthogonaux.

Le tableau suivant (*Tableau 11.2*) donne les résultats de notre exemple :

– Pour A_2 : effet sur Y = – 0,400

– Pour A_2B_1 : effet de l'interaction sur Y = 0,700

Les résultats montrent que : $\Sigma\, a_i = \Sigma\, b_j = \Sigma\, c_k = 0$

$\Sigma\, a_ib_j = \Sigma\, b_jc_k = 0$

Tableau 11.2 Résultats du plan d'expériences

Niveaux facteurs	A	B	C	D	AB	BC	Moyenne	Niveaux interactions
1	0,40	– 1,80	– 0,875	– 1,425	– 0,70	0,225	55	11
2	– 0,40	1,80	0,875	1,425	0,70	– 0,225		12
					0,70	– 0,225		21
					– 0,70	0,225		22
Somme	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		

Cela illustre que le nombre réel d'inconnues est de 7 en prenant en compte la moyenne. Cela impliquait d'avoir un plan ayant au moins 7 expériences.

L'examen des formules montre bien que les effets et interactions sont mesurés autour de la moyenne générale.

La représentation graphique des résultats est la suivante (*Figure 11.4*).

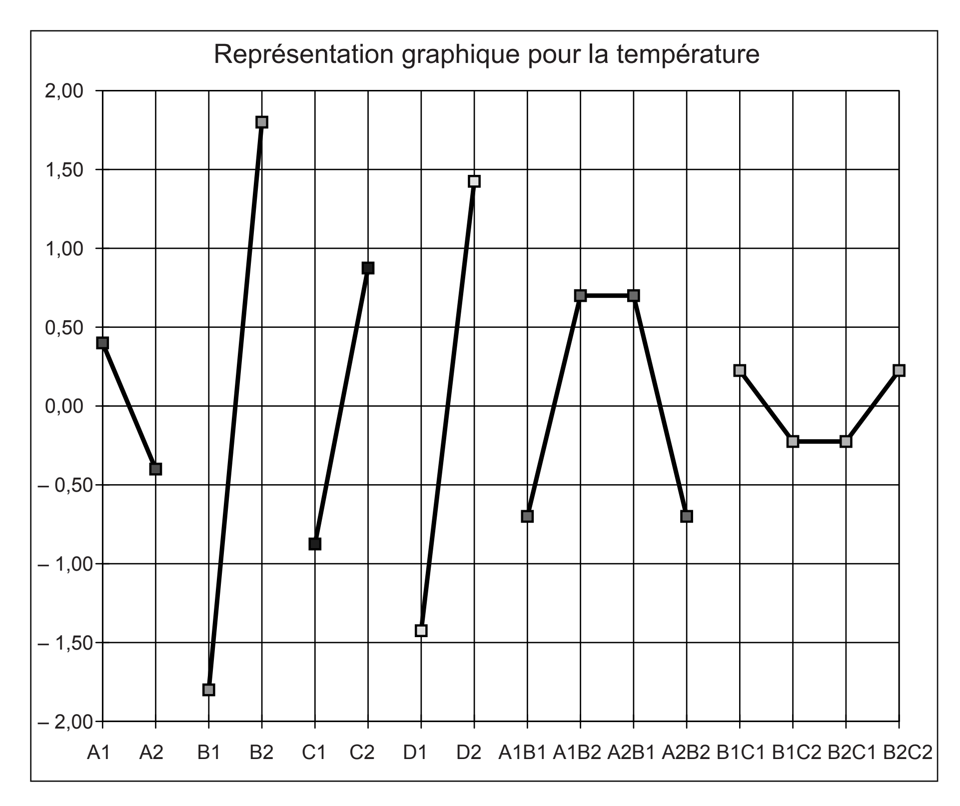


Figure 11.4 Représentation graphique du résultat pour la température

La représentation de la Figure 11.2 pourrait également être adoptée pour représenter l'effet de AB.

11.2.9 Interprétation statistique

L'ensemble de ces résultats est « pollué » par le bruit de fond aléatoire provenant de tous les facteurs non pris en compte et non stabilisés dans le plan (ce bruit que nous appelons la « résiduelle » est supposé suivre une loi de Gauss de moyenne 0, d'écart type sr identique pour chaque expérience du plan).

Ce bruit peut être important au point que les résultats trouvés n'aient aucune validité statistique.

Le tableau « d'analyse de la variance » permet à la fois d'estimer cette variance résiduelle (carré de l'écart type) et de donner le niveau de confiance statistique dans les résultats.

Le principe de ce tableau est de calculer une somme quadratique associée à chacun des facteurs, interactions ainsi qu'à la résiduelle et au total. Ces sommes quadratiques sont divisées par leur ddl (degré de liberté) c'est-à-dire le nombre de données indépendantes ayant été utilisées pour le calcul des sommes quadratiques. Par exemple Q_a est calculé à partir de a_1 et a_2 soit une seule donnée indépendante puisque $a_1 + a_2 = 0$.

Dans un souci de simplification, le tableau d'analyse de la variance (*Tableau 11.3*) donne seulement les sommes quadratiques (somme de carrés), les degrés de liberté associés… pour un facteur A et une interaction AB. Mais, bien sûr, il se généralise sans problème en ajoutant les autres facteurs et interactions traités par le plan.

Par exemple, dans le cas traité précédemment, nous aurions les colonnes correspondant à A, B, C, D, AB, BC.

Ce tableau a une propriété tout à fait particulière (Additivité des sommes quadratiques et de leur ddl). :

$$Q_t = Q_a + Q_b + ... + Q_{ab} + Q_{ac} +... + Q_r$$

$$\nu_t = \nu_a + \nu_b + ... + \nu_{ab} + \nu_{ac} +... + \nu_r$$

Les formules un peu compliquées de Q_r et ν_r ne sont pas données ici puisqu'elles peuvent être obtenues par différence du fait de l'additivité des sommes quadratiques. Parfois la résiduelle est estimée par des expériences complémentaires faites sur une position centrale et constante de tous les facteurs.

Sans donner d'explications théoriques, le principe de la vérification de la signification statistique d'un facteur ou d'une interaction suit la méthode suivante :

- Calculer les rapports F expérimentaux entre chaque carré moyen et la variance résiduelle en notant les ddl respectifs ν_1 pour le numérateur et ν_2 (c'est-à-dire ν_r) pour le dénominateur.
- Fixer un seuil de confiance ; dans notre exemple nous prendrons 5 %, c'est le risque de nous tromper dans nos conclusions sachant que la certitude n'existe pas.
- Chercher dans une table F de Snedecor la valeur de $F_{0,95}$ (*voir page suivante*) pour les ddl ν_1 et ν_2.

Si F calculé est supérieur au $F_{0,95}$ de la table le résultat est considéré comme significatif, sinon il ne doit pas être pris en compte, soit que le facteur ou l'interaction n'a aucun effet soit que le nombre d'expériences a été trop réduit pour le mettre en évidence.

Tableau 11.3 Analyse de la variance

Origine	Facteur A	...	Interaction AB	...	...	Résiduelle	Total
Somme des carrés	$Q_a = N/I.\ \Sigma\ a_i^2$		$Q_{ab} = N/IJ.\ \Sigma\ (a_i b_j)^2$			Q_r	$Q_t = \Sigma\ y^2 - (\Sigma y)^2/N$
Degré de liberté (ddl)	$\nu_a = I - 1$		$\nu_{ab} = (I - 1)\ (J - 1)$			ν_r	$\nu_t = N - 1$
Carré moyen	$S_a^2 = Q_a/(I - 1)$		$S_{ab}^2 = Q_{ab}/(I - 1)\ (J - 1)$			$S_r^2 = Q_r/\nu_r$	$S_t^2 = Q_t/(N - 1)$
F de Snedecor	$F = S_a^2/S_r^2$		$F = S_{ab}^2/S_r^2$				

N = nombre total d'expériences

Pour le cas traité précédemment :

pour A : ν_a (ddl de la somme des carrés) = 1

ν_r (ddl de la résiduelle) = 1

la table donne $F_{0,95}$ = 161 et le résultat du calcul a donné 256 : les estimations a_i sont donc très significatives. C'est-à-dire que l'on peut accorder une grande confiance dans les résultats trouvés et ceci d'autant plus que l'écart entre 256 et 161 est grand.

pour BC : ν_{bc} (ddl de la somme des carrés) = 1

ν_r (ddl de la résiduelle) = 1

la table donne $F_{0,95}$ = 161 et le résultat du calcul a donné 81 : les estimations $b_j c_k$ ne sont pas significatives ; les résultats sont donc à ne pas prendre en compte.

Nous voyons dans le tableau suivant l'ensemble des résultats où il apparaît que les effets A, B, C, D et l'interaction AB sont significatives.

Nous notons l'information importante de la valeur de la variance résiduelle (très faible dans notre exemple) : $S_r^2 = 0{,}0050$

Tableau 11.4 Analyse de la variance

	A	B	C	D	AB	BC	Résiduelle	Total
Q	1,28	25,92	6,13	16,24	3,92	0,40	0,005	53,90
ddl	1	1	1	1	1	1	1	7
S2	1,28	25,92	6,13	16,24	3,92	0,40	0,005	7,70
F	256	5 184	1 225	3 249	484	81		
F table à 0,95	161	161	161	161	161	161		

(*Voir tableau 11.5 page suivante.*)

11.2.10 Conclusions du plan

Nous choisissons pour chaque facteur le niveau qui rend minimum la caractéristique étudiée, c'est-à-dire la température que nous cherchons à diminuer, soit :

A2, B1, C1, D1

Tableau 11.5 F de Snedecor pour P = 0,95[1]

	ν_1		= ddl du numérateur		
ν_2	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2
2	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90

Mais il faut prendre en compte les interactions :

– Ayant choisi A_2 et B_1 nous avons fait indirectement le choix de l'interaction A_2B_1 ; or il s'avère qu'elle augmente la température de 0,7. Nous avons donc intérêt à choisir l'interaction A_1B_1 qui fait gagner 0,7 même si A_1 fait perdre 0,4.
– Quant à l'interaction BC, nous n'avons pas à nous en occuper puisque le test de signification a donné un résultat non significatif.

1. En pratique, la table n'est pas indispensable car le tableur Excel donne F de Snedecor comme une fonction.

Le bilan peut finalement s'écrire :

Yestimé = m + A_1 + B_1 + C_1 + D_1 + A_2B_1

55 + 0,4 – 1,80 – 0,875 – 1,425 – 0,70 = 50,60

11.2.11 Validation

Il est souhaitable de faire une vérification du résultat par quelques expériences dans les conditions ainsi déterminées.

11.2.12 Conclusions

L'exemple retenu ici est très simple et permet avec huit expériences seulement d'obtenir un maximum d'informations. Dans la pratique courante, les résultats peuvent être beaucoup plus impressionnants.

Par exemple 15 facteurs (à 2, 3 ou 4 niveaux pour certains) ou interactions peuvent être traités avec seulement de l'ordre de 20 à 30 expériences, sans oublier que les résultats sont obtenus avec une « précision » ou une « confiance » très supérieure à celle obtenue avec la méthode « traditionnelle ».

11.3 Plans d'expériences : Les plans Taguchi

11.3.1 Notion de « confusion »

Taguchi propose une méthodologie complète de recherches des plans d'expériences dont nous allons développer les caractéristiques générales.

Un préalable à l'examen de cette méthodologie est de connaître la notion de « confusion ». Ceci est d'ailleurs vrai pour l'ensemble des méthodes de recherche de plans.

Dans le chapitre précédent, nous avions utilisé le plan suivant (*Tableau 11.6*) pour étudier l'effet de certains facteurs sur la température interne d'un rétroprojecteur.

Ce plan avait été choisi pour rechercher les éventuels effets de :

– A Forme ailettes du ventilateur :
  - A1 forme n° 1,
  - A2 forme n° 2 ;

Tableau 11.6 Effets de différents facteurs sur la température interne d'un rétroprojecteur

	Ailettes	Position ventilateur	Forme ouvertures	Largeur ouvertures	Y Température
	A	B	C	D	Résultats
essai 1	1	1	1	1	50,8
essai 2	1	1	2	2	55,0
essai 3	1	2	1	2	58,2
essai 4	1	2	2	1	57,6
essai 5	2	1	1	2	54,3
essai 6	2	1	2	1	52,7
essai 7	2	2	1	1	53,2
essai 8	2	2	2	2	58,2

– B Position du ventilateur :
  - B1 en haut,
  - B2 en bas ;
– C Forme des ouvertures :
  - C1 simple,
  - C2 avec courbures ;
– D Largeur des ouvertures :
  - D1 2 mm,
  - D2 3 mm ;
– AB Interaction « Forme ailettes du ventilateur » × « Position du ventilateur » ;
– BC Interaction « Forme des ouvertures » × « Position du ventilateur ».

Nous avions supposé que les autres interactions n'avaient aucun effet ; il s'agit des interactions :

– de rang 1 : AC, AD, BD, CD ;
– de rang 2 : ABC, ABD, ACD, BCD ;
– de rang 3 : ABCD.

Si ces interactions étaient effectives, il faudrait pour les estimer utiliser un « plan factoriel » impliquant $2^4 = 16$ expériences.

Dans notre exemple très simple, passer de 8 à 16 essais n'est pas catastrophique, mais dès que l'on augmente le nombre de facteurs et le nombre de modalités de chacun des facteurs, le nombre d'expériences nécessaires avec un plan factoriel devient prohibitif.

A contrario, faire l'hypothèse que certaines interactions n'ont pas d'effet, permet de réduire le nombre d'expériences d'une façon très importante.

Le risque pris en supposant toutes ces interactions sans effet est que cette hypothèse soit fausse. Cela se traduirait par des risques de « confusions ». En effet, comme on le verra plus loin, le plan choisi dans notre exemple présente les confusions suivantes :

– AB avec CD, BC avec AD ;

– A avec BCD, B avec ACD, C avec ABD, D avec ABC ;

(On dit aussi que, par exemple, CD est un « aliase » de AB).

Prenons l'exemple de la confusion entre AB et CD. Le plan a été choisi étant convaincu que physiquement une interaction CD n'avait pas de sens, donc le nombre d'expériences a été réduit permettant de calculer AB mais non CD. Supposons que l'hypothèse que CD n'a pas d'effet soit fausse, nous sommes confrontés au fait que si les calculs montrent une interaction AB nous allons faire une erreur d'interprétation. Rien ne nous permettra de dire si l'interaction calculée est bien AB ou CD ou les deux à la fois.

Nous voyons là l'importance des hypothèses de départ qui doivent s'appuyer sur des considérations techniques solides. Notons que les interactions d'ordre supérieur à 1 sont assez rares.

11.3.2 Méthode Taguchi

● Nature des plans

Les plans d'expériences sont en grande majorité des plans optimaux, fractionnaires à 2 ou 3 modalités.

Pour simplifier, sans entrer dans des considérations mathématiques, nous dirons qu'un plan optimal est celui qui nous donne la précision maximale.

Un plan fractionnaire est obtenu en fractionnant un plan factoriel qui, lui, prend en compte toutes les interactions possibles.

● Choix des interactions

L'approche Taguchi est caractérisée par la détermination *a priori* des interactions qui seront retenues et par l'hypothèse générale qu'il n'y a pas d'interaction de rang supérieur à 1, par exemple ABC qui est de rang 2. Nous avons vu précédemment l'importance de ce choix.

● Tables de Taguchi

Taguchi propose des tables de plans prêts à l'emploi. Prenons l'exemple de la table L_8 (2^7) (*Tableau 11.7*). Il s'agit d'une table de 8 expériences permettant de rechercher l'influence de 7 facteurs à 2 modalités (notées 1 et 2).

Tableau 11.7 Table L_8 (2^7)

Table L_8 (2^7)							
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Triangle des interactions						
1	2	3	4	5	6	7
(1)	3	2	5	4	7	6
	(2)	1	6	7	4	5
		(3)	7	6	5	4
			(4)	1	2	3
				(5)	3	2
					(6)	1

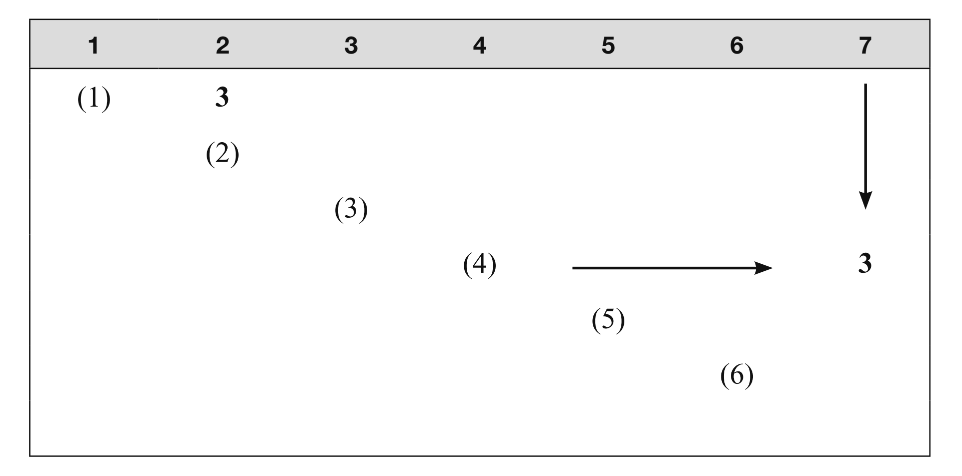
Chaque ligne est une expérience numérotée de 1 à 8.

Chaque colonne est un facteur numéroté de 1 à 7.

À chaque plan est associé un « triangle des interactions ». Ce triangle nous indique toutes les « confusions » possibles entre des interactions de rang 1 et des facteurs.

Examinons le triangle de la table L_8 (2^7). Il met en évidence qu'il y a confusion entre l'interaction entre les facteurs 4 et 7 (écrite 4×7) et le facteur 3 conformément à l'extrait ci-dessous (*Tableau 11.8*).

Tableau 11.8 Triangle des interactions (extrait)



1	2	3	4	5	6	7
(1)	**3**					
	(2)					
		(3)				
			(4)			**3**
				(5)		
					(6)	

Il met également en évidence la confusion entre l'interaction entre les facteurs 1 et 2 (écrite 1 × 2) et le facteur 3. Donc il y a également confusion entre les interactions 1 × 2 et 4 × 7 puisqu'elles sont chacune confondues avec le même facteur 3.

Autrement dit, il faudra choisir entre tester le facteur 3, l'interaction 1 × 2 ou l'interaction 4 × 7 mais il est exclu de les étudier ensemble avec ce plan.

● Représentation par graphes linéaires

Taguchi propose une méthode qui permet de simplifier considérablement la recherche d'un plan à partir d'une table avec l'utilisation de « graphes linéaires ». Il associe à chaque table plusieurs graphes linéaires.

Dans ces graphes, un **facteur** est représenté par un **rond**.

À noter que ces ronds sont représentés différemment selon que le passage, au cours de l'exécution du futur plan, d'une modalité à l'autre du facteur, est plus ou moins difficile (*Tableau 11.9*).

Cette astuce permet de choisir prioritairement, par exemple, un plan qui ne ferait passer qu'une fois d'une modalité 1 à une modalité 2 un facteur si ce passage est très difficile.

Par exemple si le plan porte sur le fonctionnement d'une machine et que la modification d'un des facteurs demande une modification lourde de cette machine, il est appréciable de ne pas avoir à faire cette modification un trop grand nombre de fois.

Tableau 11.9 Représentation des difficultés à passer d'une modalité à l'autre

Symboles	Groupe	Difficulté de modification des modalités
⬯	1	Difficile
◎	2	Assez difficile
◉	3	Assez facile
●	4	Facile

- Une **interaction** est représentée par une **droite** réunissant les deux facteurs (ronds) concernés.
- La méthode consiste à faire un graphe linéaire du plan à traiter et de chercher dans ceux de la table celui qui convient.

Dans notre exemple le graphe correspondant à l'étude des facteurs A, B, C, D et interactions AB et BC est représenté ci-dessous (*Figure 11.5*).

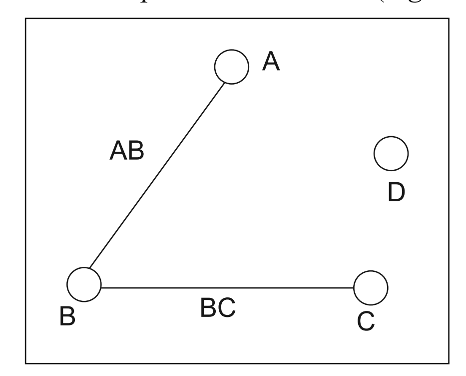


Figure 11.5 Graphe linéaire du plan à traiter

La table L_8 (2^7) permettant de réaliser des plans à 8 expériences propose plusieurs graphes linéaires dont celui de la Figure 11.6. Celui-ci permet bien d'intégrer notre plan à étudier. On voit que le plan où : A est en 1, B en 2, C en 4, D en 7 conviendra.

On note que :

- la colonne 3 de table L_8 (2^7) n'est plus disponible car utilisée pour l'interaction AB ;
- la colonne 6 n'est plus disponible car utilisée pour l'interaction BC ;

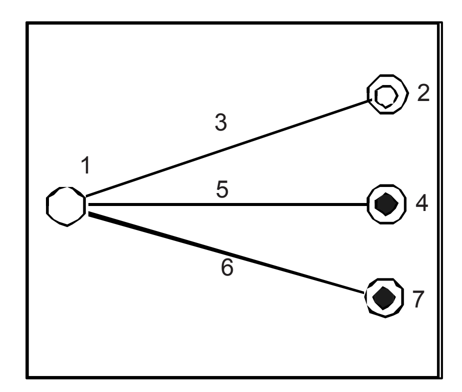


Figure 11.6 Graphes proposés par la table L_8 (2^7)

– la colonne 5 aurait permis de traiter un facteur supplémentaire. Nous ne traitons pas ici du calcul statistique de la signification des résultats du plan, mais le test montrerait qu'un tel plan ne permettrait plus ce test (voir tableau d'analyse de la variance) car le problème posé aurait 8 inconnues à traiter pour seulement 8 expériences.

On obtient finalement le plan suivant (*Tableau 11.10*).

Tableau 11.10 Plan obtenu

	A 1	B 2	C 4	D 7
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	2	1	2
4	1	2	2	1
5	2	1	1	2
6	2	1	2	1
7	2	2	1	1
8	2	2	2	2

● Classification des tables Taguchi

Taguchi propose de nombreuses tables. Elles se classent de la façon suivante en fonction de leur aptitude à traiter des interactions (*Tableau 11.11*).

Tableau 11.11 Prise en compte des interactions

Impossibles	Limitées	Possibles
L_{12} (2^{11})	L_{18} (2^1 x 3^7)	L_4 (2^3)
L_{36} (2^{11} x 3^{12})	L_{32} (2^1 x 4^9)	L_8 (2^7)
	L_{50} (2^1 x 5^{11})	L_{16} (2^{15})
		L_{32} (2^{31})
		L_{64} (2^{63})
		L_9 (3^4)
		L_{27} (3^{13})
		L_{81} (3^{40})
		L_{36} (2^3 x 3^{13})
		L_{54} (2^1 x 3^{25})
		L_{16} (4^5)
		L_{64} (4^{21})

Par exemple L_{32} (21 × 49) représente un plan permettant de traiter avec 32 expériences un facteur à 2 modalités et 9 facteurs à 4 modalités.

● Modifications des graphes linéaires

Il se peut que les graphes proposés ne correspondent pas au problème posé. Dans ce cas, il est possible de les modifier en utilisant quelques règles.

Rupture d'une ligne : Supprimer une interaction libère la ou les colonnes correspondantes (*Figure 11.7*).

Avant	1 3 2	1 3,4 2
Après	1 3 2	1 3 4 2

Figure 11.7 Suppression d'une interaction

Dans certaines tables, l'interaction entre 2 facteurs « consomme » 2 facteurs.

Formation d'une ligne : Pour créer une interaction, on cherche celle-ci dans le triangle des interactions sachant que la colonne correspondante n'est plus disponible par ailleurs (*Figure 11.8*).

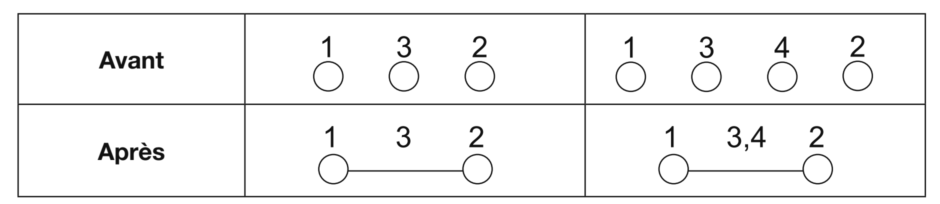


Figure 11.8 Création d'une interaction

Création d'un facteur à 4 modalités à partir de 3 facteurs à 2 modalités : Il est possible de créer une colonne (un facteur) à 4 modalités à partir de 3 facteurs à 2 modalités. Toutefois il faudra que, parmi ces 3 colonnes, l'une soit l'interaction des 2 autres.

Nous représentons ce facteur en graphe linéaire de la façon suivante (*Figure 11.9*).

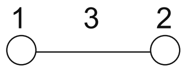


Figure 11.9 Représentation d'un facteur à 4 modalités sous forme de graphe linéaire

Le codage des modalités peut se faire de la façon suivante dans l'exemple de la table L8 (27) (*Tableau 11.12*).

Tableau 11.12 Codage des modalités

Plan avec 1 facteur à 4 modalités					
	1 2 3	4	5	6	7
1	1 1 1	1	1	1	1
2	1 1 1	2	2	2	2
3	1 2 2	1	1	2	2
4	1 2 2	2	2	1	1
5	2 1 2	1	2	1	2
6	2 1 2	2	1	2	1
7	2 2 1	1	2	2	1
8	2 2 1	2	1	1	2

Plan avec 1 facteur à 4 modalités (codage des modalités)				
(1,2,3)	4	5	6	7
1	1	1	1	1
1	2	2	2	2
2	1	1	2	2
2	2	2	1	1
3	1	2	1	2
3	2	1	2	1
4	1	2	2	1
4	2	1	1	2

11.3.3 Interaction avec un facteur à 4 modalités

Prenons un nouvel exemple : soit à étudier l'influence de facteurs : A, B, C, D, E, F. Nous pensons que les seules interactions réalistes sont : AB, AD, BD.

Le tableau suivant (*Tableau 11.13*) indique le nombre de modalités et la difficulté à faire varier chaque facteur.

Tableau 11.13 Nombre de modalités et niveau de difficulté à passer d'une modalité à l'autre pour chaque facteur

Facteurs	A	B	C	D	E	F
Modalités	4	2	2	2	2	2
Difficultés	○	◉	◉	◉	●	●

Notons que le facteur A a 4 modalités et que nous souhaitons chercher les interactions de ce facteur A avec B et D.

Nous faisons le graphe linéaire où A est représenté par 3 facteurs à 2 modalités comme expliqué plus haut, ce qui va nous permettre d'utiliser une table avec uniquement des facteurs à 2 modalités (*Figure 11.10*).

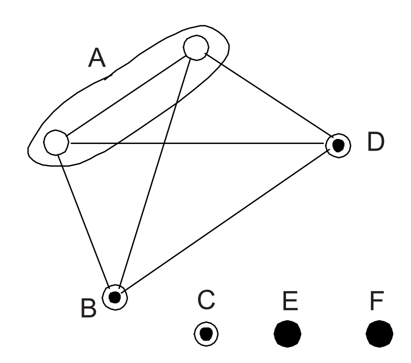


Figure 11.10 Graphe linéaire avec 3 facteurs à 2 modalités

● **Graphe du plan à étudier**

Si l'on se réfère au principe des plans d'expériences, le nombre d'inconnues à calculer est de :

– A B C D E F AB AD BD Moyenne

– 3 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 3 + 3 + 1 + 1 = 16

Or Taguchi propose une table L_{16} (2^{15}) qui traite 15 facteurs avec 16 expériences. Ce nombre d'expériences pourrait être suffisant.

Nous allons comparer le graphe linéaire de notre problème au graphe suivant qui est l'un de ceux proposés par Taguchi dans la table L_{16} (2^{15}) et qui nous semble bien prendre en compte le graphe décrivant notre problème (*Figure 11.11*).

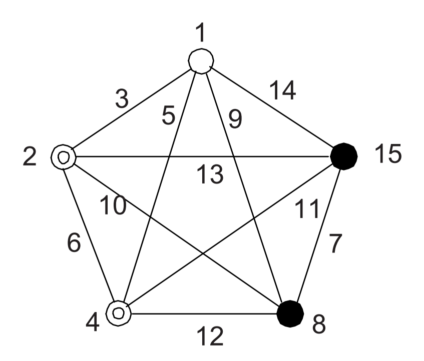


Figure 11.11 Un des graphes linéaires de la table L_{16} (2^{15})

● Affectation des colonnes

Celle-ci se fait en comparant les 2 graphes et en utilisant les règles de modification des graphes linéaires pour adapter le graphe de la table.

Nous essayons la solution suivante (*Tableau 11.14*).

Tableau 11.14 Adaptation du graphe de la table

1	2	3	4	8	9	10	15
A	A	A	B	E	F	C	D

L'interaction AB consomme les colonnes 5, 6, 7

– 5 : interaction entre 1 et 4 (vu sur le graphe de la table) ;

– 6 : interaction entre 2 et 4 (vu sur le graphe de la table) ;

– 7 : interaction entre 3 et 4 (vu sur le triangle des interactions, voir un extrait *Tableau 11.15*).

L'interaction AD consomme les colonnes 12, 13, 14

– 14 : interaction entre 1 et 15 (vu sur le graphe de la table) ;

– 13 : interaction entre 2 et 15 (vu sur le graphe de la table) ;

– 12 : interaction entre 3 et 15 (vu sur le triangle des interactions, voir extrait *Tableau 11.15*).

L'interaction BD consomme la colonne 11 (vu sur le graphe de la table).

Tableau 11.15 Triangle des interactions (représentation partielle)

1	2	3	4	15
(1)				14
	(2)			13
		(3)	7	12
			(4)	11

Finalement, nous avons consommé les 15 colonnes de la table et nous pouvons vérifier qu'aucune colonne n'a été prise plus d'une fois. Ceci aurait pu ne pas être le cas. Il aurait fallu essayer d'autres choix mais plus probablement passer à un plan nécessitant plus d'expériences.

● **Détermination du plan d'expériences**

Nous pouvons maintenant extraire notre plan de la table L_{16} (2^{15}) (*Tableau 11.16*).

● **Conclusions sur les graphes linéaires**

La méthode proposée par Taguchi facilite énormément la détermination d'un plan d'expériences, même si les manipulations à effectuer peuvent paraître parfois un peu difficiles. Une comparaison avec d'autres méthodes montrerait que les plans obtenus ne sont pas nécessairement les meilleurs notamment sur le plan de la maîtrise des confusions. Il est souhaitable que les risques de confusion d'un facteur soient avec des interactions de rang le plus élevé possible car les plus improbables physiquement ; ce n'est pas toujours le cas avec les plans Taguchi. Mais la relative simplicité de cette méthode est telle qu'elle a contribué grandement à sortir les techniques de plans d'expériences du domaine des spécialistes pour en faire un outil de vulgarisation très intéressant.

Tableau 11.16 Extraction de la table

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

En intégrant nos choix pour les facteurs nous obtenons le plan du *Tableau 11.17 (page suivante)*.

11.3.4 Robustesse

● Définition

Taguchi a introduit la notion complémentaire de robustesse. Il considère deux types de facteurs :

– A, B, C... : les facteurs à étudier qui sont maîtrisés : par exemple, la position du ventilateur dans notre exemple de rétroprojecteur ;

– R, S, T... : les facteurs « bruits » qui sont non maîtrisés et qui viennent perturber les résultats du paramètre considéré. Cela pourrait être la température extérieure ou la pression atmosphérique. Pour les intégrer dans un plan, cela suppose que l'on puisse les maîtriser au moins pour la réalisation du plan.

Tableau 11.17 Plan final

A	B	E	F	C	D
1 2 3	**4**	**8**	**9**	**10**	**15**
1	1	1	1	1	1
1	1	2	2	2	2
1	2	1	1	1	2
1	2	2	2	2	1
2	1	1	1	2	2
2	1	2	2	1	1
2	2	1	1	2	1
2	2	2	2	1	2
3	1	1	2	1	2
3	1	2	1	2	1
3	2	1	2	1	1
3	2	2	1	2	2
4	1	1	2	2	1
4	1	2	1	1	2
4	2	1	2	2	2
4	2	2	1	1	1

Les facteurs R, S, T... créent une variabilité qui peut être plus ou moins forte selon les modalités des facteurs contrôlés A, B, C... L'idée de Taguchi est de choisir les modalités à donner à A, B, C... de telle sorte que la variabilité apportée par les facteurs R, S, T... soit minimum. Cela revient à chercher en complémentarité de l'optimisation classique des facteurs A, B, C... la combinaison de ces modalités des facteurs qui rende **maximum** ce que Taguchi calcule d'une façon empirique, le rapport « **Signal sur bruit** ».

Autrement dit, un **résultat est robuste** s'il est peu sensible aux facteurs externes non maîtrisés.

Cela signifie que, si l'on obtient une réponse y optimum avec certaines modalités des facteurs A, B, C, on pourra préférer obtenir une réponse y moins favorable mais peu sensible aux variations des facteurs bruit. Dans notre exemple, cela pourrait se traduire par accepter une température plus forte dans le rétroprojecteur mais peu sensible aux conditions extérieures.

● Nature du plan

L'exemple suivant montre un plan permettant de rechercher une solution robuste. En fait, il s'agit d'un plan double avec pour A B C un plan L_8 (2^7) et pour les facteurs bruits R S T un plan L_4 (2^3) qui est transcrit avec les facteurs en ligne et non en colonne. On dit que le plan est un plan double $L_8 \times L_4$ (*Tableau 11.18*).

Tableau 11.18 Plan double

	R S T	1 1 2 2 1 2 1 2 1 2 2 1			
	A B C		**Moyenne**	**Variances**	**Rapport signal/bruit**
1	1 1 1	y_{11} y_{12} y_{13} y_{14}	m_1	s_1^2	S/B_1
2	1 1 2	y_{21} y_{22} y_{23} y_{24}	m_2	s_2^2	S/B_2
3	1 2 1	y_{31} y_{32} y_{33} y_{34}	m_3	s_3^2	S/B^3
4	1 2 2	y_{41} y_{42} y_{43} y_{44}	m_4	s_4^2	S/B_4
5	2 1 1	y_{51} y_{52} y_{53} y_{54}	m_5	s_5^2	S/B_5
6	2 1 2	y_{61} y_{62} y_{63} y_{64}	m_6	s_6^2	S/B_6
7	2 2 1	y_{71} y_{72} y_{73} y_{74}	m_7	s_7^2	S/B_7
8	2 2 2	y_{81} y_{82} y_{83} y_{84}	m_8	s_8^2	S/B_8

● Analyse classique

Concernant **l'effet *y***, les estimations de l'influence des facteurs et interactions éventuelles et le tableau d'analyse de la variance se font normalement.

On dispose pour chaque expérience de 4 résultats.

11.3.5 Rapport signal sur bruit

Nous nous trouvons devant le même plan avec les facteurs A, B, C. L'effet qui nous intéresse n'est plus y, mais le résultat d'un calcul sur les moyennes et variances de *y* pour chaque expérience, qui est qualifié de « rapport signal sur bruit » :

– Soit *i* le n° de chaque ligne de résultats.

– Soit *j* le n° de chaque colonne de résultats.

On calcule pour chaque ligne *i* du plan d'essai principal le rapport signal sur bruit.

Taguchi propose trois calculs possibles de ce « **rapport signal sur bruit** » selon l'objectif poursuivi :

Objectif : *y* le plus grand possible	Rapport S/B = – 10 Log_{10} [(1/n). Σ_j $(1/y_{ij})^2$)]
Objectif : *y* le plus près de la nominale	Rapport S/B = 10 Log_{10} [m_i^2/s_i^2]
Objectif : *y* le plus petit possible	Rapport S/B = – 10 Log_{10} [(1/n). Σ j (y_{ij}^2)]

On choisit, en fonction de l'objectif poursuivi, les combinaisons des modalités des facteurs A, B, C qui rendent maximum ce rapport.

Il y a lieu alors de traiter les conflits entre la combinaison optimum des facteurs A, B, C... et les combinaisons des mêmes facteurs qui optimisent le rapport signal sur bruit.

12

La gestion des risques et l'AMDEC

12.1 Gestion des risques

La norme ISO 9001 n'emploie pas spécifiquement le terme de « gestion des risques ». On y trouve une exigence de démonstration de « l'aptitude des processus à atteindre les résultats planifiés » (*§ 8.2.3 « Surveillance et mesure des **processus** » de la norme*) ainsi que « l'exigence d'actions préventives relatives aux non-conformités potentielles des **produits** » (*§ 8.5.2 « Actions préventives » de la norme*). Or, si ce terme de risque n'est pas employé, ces deux exigences montrent que la maîtrise des risques est au cœur du management de la qualité, qu'il s'agisse du produit ou du fonctionnement du système qualité. De plus, la maîtrise des risques est un thème très actuel s'imposant dans de nombreux domaines, notamment dans ceux très connexes à la qualité que sont l'environnement et la sécurité. Nous sommes à une époque où l'on accepte de moins en moins le risque ; même si le risque zéro n'existe pas, nous souhaitons les réduire au maximum.

12.2 AMDEC

Comme nous avons pu le dire précédemment, l'AMDEC est par excellence l'outil majeur de la maîtrise des risques. Cette méthode très ancienne, mise au point par les Américains, a sans cesse été perfectionnée. Elle répond bien à ce besoin de réduire les risques. Le nom AMDEC correspond aux initiales de la méthode : « Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leur criticité », en anglais : FMECA-*Failure Mode and Effect and Criticality Analysis*[1].

12.3 Objectif de l'AMDEC

Cette expression de « Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leur Criticité » est très explicite. L'objectif est de rechercher systématiquement toutes les défaillances potentielles et de mettre en place des solutions adaptées à la criticité du problème.

Il est intéressant de constater qu'elle répond point par point au texte de la norme (pour le produit).

> **ISO 9001:2008 § 8.5.2 « Action préventive » :**
>
> « (…) Une procédure documentée doit être établie afin de définir les exigences pour
>
> a) déterminer les non-conformités potentielles et leurs causes ;
>
> b) évaluer le besoin d'entreprendre des actions pour éviter l'apparition de non-conformités ;
>
> c) déterminer et mettre en œuvre les actions nécessaires ;
>
> d) enregistrer les résultats des actions mises en œuvre ;
>
> e) évaluer l'efficacité des actions préventives mises en œuvre. ».

L'ISO 9001 n'a pas imposé l'AMDEC dans un souci de laisser l'entreprise maître de ses méthodes. Mais il est à noter que l'ISO/TS 16949 qui est spécifique au domaine de l'automobile, impose l'emploi de l'AMDEC.

L'AMDEC est une méthode préventive. Son principe de base est « **bien faire du premier coup** ».

1. Nous sommes surpris de voir que l'expression FMEA, au lieu de FMECA, est la plus utilisé ne mettant pas en valeur l'élément essentiel, à notre point de vue, de criticité.

12.4 Les différentes AMDEC

La méthode a été développée pour traiter le risque de défaillances dans trois domaines :

– **L'AMDEC Produit** qui s'intéresse aux risques de défaillances d'un produit. Elle est donc essentiellement orientée vers la fiabilité du produit et elle se fait dans le cadre du processus de conception.

– **L'AMDEC Procédé de fabrication** qui s'intéresse aux risques qui conduiraient un procédé de fabrication à ne pas fonctionner ou donner des produits non conformes.

– **L'AMDEC Moyen de production** qui permet d'anticiper les risques de non-fonctionnement ou de fonctionnement anormal d'un équipement, d'une machine.

Mais l'intérêt de la méthode tend à en généraliser l'emploi à tout type de risque. On peut donc l'adapter sans grande difficulté pour traiter des risques dans des domaines tels que :

– le projet de conception d'un produit : il ne s'agit plus du tout du produit lui-même mais bien du projet de conception d'un produit ;

– la mise en place d'un processus ;

– le plan d'achat lors de la conception d'un nouveau produit ;

– la sécurité dans l'entreprise ;

– une démarche de protection de l'environnement.

Plus généralement on peut faire une AMDEC pour tout type de projet, par exemple un projet informatique, logistique, d'implantation, de déménagement…

Notons également le cas de la méthode HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point*) qui est un système de gestion de la qualité spécifique à la sécurité alimentaire et qui a pour base les principes de l'AMDEC.

Nous allons nous limiter à présenter deux cas particuliers :

– AMDEC produit (les principes qu'il présente sont les mêmes que pour ceux de toute AMDEC, mais selon les cas il faudra adapter la mise en œuvre) ;

– AMDEC projet.

12.5 AMDEC Produit

Nous allons en décrire les principes de base à partir de l'exemple tout à fait partiel du tiroir d'insertion d'un lecteur de DVD. Cet exemple est purement fictif.

12.5.1 Quand faire l'AMDEC produit

Elle se pratique au moment de la conception du produit, dans le cadre de l'étude de la fiabilité, et ceci le plus tôt possible. On part donc (autant que possible) des plans, éventuellement d'un prototype (c'est déjà un peu tard). À ce stade, les modifications restent possibles et peu chères.

On prévoit parfois deux AMDEC : l'une en début de conception, l'autre de consolidation avant la fin de la conception. L'AMDEC produit fait partie intégrante du processus de conception. Ses résultats font partie des critères de décision lors des revues.

12.5.2 Une méthode participative

L'AMDEC est une méthode participative, le groupe de travail pouvant être constitué de personnes des services suivants : bureau d'études, production, industrialisation, méthodes, commercial, achats, SAV, qualité. Elle part de la mise en commun de l'expérience des personnes concernées.

12.5.3 Les étapes d'une AMDEC produit

- **1- Choix du domaine étudié**

Si le produit à étudier est un peu complexe, la recherche des défaillances possible est un travail beaucoup trop important. Il faut être sélectif.

La plupart du temps la conception concerne un nouveau modèle et on a une expérience des produits antérieurs. Les parties déjà conçues sur des modèles antérieurs ne sont absolument pas concernées par l'AMDEC. Elles relèvent du processus d'amélioration partant de l'expérience en clientèle comme nous l'avons présenté dans les chapitres sur la Sûreté de Fonctionnement.

Il faut ne s'attaquer qu'aux parties innovantes du produit. En effet, autant l'innovation est une bonne chose, autant elle pose un problème d'un point de vue qualité. L'innovation nous place en situation de risque et elle nous impose une attention particulière avec, entre autre, un travail de contrôle et vérification qui peut être très important.

- **2- Décomposition fonctionnelle du produit et analyse du fonctionnement**

Ayant fait cette sélection, il est souhaitable de s'appuyer sur l'analyse fonctionnelle du produit (*voir paragraphe 12.2*) de façon à organiser le travail d'analyse fonction par fonction. Là encore il peut y avoir des priorités à se fixer pour alléger la charge de travail. Faute de disposer d'une analyse fonctionnelle, on peut raisonner par sous-ensembles ou parties du produit.

Le groupe de travail va alors procéder à l'analyse du fonctionnement du produit pour la fonction étudiée ; il examine comment le concepteur a traduit les fonctions du produit en solutions techniques, quels sont les sous-ensembles ou composants concernés. L'étude examine les états statiques et dynamiques.

Une difficulté de l'AMDEC est de se placer sur le bon niveau pour l'analyse des causes. Si l'on est au niveau d'un appareil, les causes sont au niveau des sous-ensembles. Si l'on est au niveau d'un sous-ensemble les causes sont au niveau des composants, etc.

- **3- Recherche de toutes les défaillances potentielles**

Le mode de défaillance est le caractère perceptible ou observable de la défaillance. On peut dire le symptôme. On entend par défaillances toute modification de fonction : perte, dégradation, fonctionnement intempestif.

- **4- Détermination des causes des défaillances et de leurs effets**

Chaque défaillance a des conséquences plus ou moins graves pour l'utilisateur. C'est ce que l'on appelle son effet et que l'on évalue sous forme d'une gravité. En pratique la défaillance peut se manifester chez le client mais aussi en production. Si les deux peuvent arriver, on prendra le cas le plus grave des deux.

À chaque défaillance peuvent correspondre plusieurs causes que le groupe doit imaginer comme possibles.

- **5- Recensement des moyens de détection prévus**

Dans le cadre du projet de développement est prévu un plan d'étude et de contrôle.

Le plan de contrôle sera ou non en mesure de détecter les causes si elles se manifestent au cours des contrôles.

Examinons notre exemple : la corrosion éventuelle du ressort serait sans doute détectée par un test de « chaleur humide » mais non par le test d'endurance « ouverture, fermeture ».

Le programme d'études serait en mesure de vérifier la résistance à la fatigue du ressort seulement si ce point fait partie de ce programme.

Notons un cas particulier : la lubrification insuffisante du roulement peut dépendre du fournisseur qui pourrait fournir un lot défectueux sur ce plan. Ceci ne peut pas être vérifié au cours de la conception. À ce stade on ne peut agir qu'en fixant les exigences dans la spécification du roulement. Et une défaillance sur ce point ne sera détectée que par un contrôle en production.

● 6- Évaluation de la criticité

Nous sommes en présence d'une méthode classique de « critères de choix » telle que présentée dans les méthodes du travail en groupe. La criticité sera égale au produit de trois critères :

– O : La probabilité d'occurrence : il s'agit de la probabilité de défaillances à l'utilisation du produit ou éventuellement en cours de production du produit.
– D : La non-détectabilité de la cause de la défaillance. Si le produit en cours de conception a une défaillance potentielle le plan de contrôle de conception aura plus ou moins de chance de la révéler.
– S : La gravité de la défaillance (S comme *seriousness*) : il s'agit de l'importance des conséquences que la défaillance pourrait générer lors de son apparition éventuelle en cours d'utilisation du produit ou éventuellement au cours de sa production.

Nous proposons un exemple de grilles permettant au groupe de se mettre d'accord sur un niveau pour chacun des critères. Nous avons fait le choix de cinq niveaux, ce qui nous paraît suffisant alors que souvent les grilles en prévoient dix.

Tableau 12.1 Gravité de la défaillance

S	Manifestation de la défaillance chez le client ou l'utilisateur	Manifestation de la défaillance en production
1	Ne provoque qu'une gêne légère	Gène légère Pas de perturbation du flux
2	Indispose le client	Mécontentement Légère perturbation du flux

Tableau 12.1 Gravité de la défaillance (fin)

S	Manifestation de la défaillance chez le client ou l'utilisateur	Manifestation de la défaillance en production
3	Mécontente le client Frais assez importants	Mécontentement sérieux Importante perturbation du flux
4	Grand mécontentement Panne complète Entraîne des frais importants	Grand mécontentement Importante perturbation du flux Frais importants
5	Problèmes de sécurité Non-conformité à la réglementation	Problèmes de sécurité

Tableau 12.2 Calcul de la probabilité d'occurrence

O	Probabilité d'occurrence de la cause de la défaillance
1	Faible
2	Assez faible
3	Modéré
4	Probable
5	Très probable

Ce classement est assez subjectif et cela s'avère en général suffisant dans ce travail en groupe où les participants arrivent assez bien à se mettre d'accord. Dans un domaine très bien maîtrisé, on pourrait l'objectiver par des « taux de défaillances » mais cela nous paraît assez illusoire.

Tableau 12.3 Calcul de la non détectabilité

D	Chance que le plan de contrôle ou le programme d'étude détecte la cause de la défaillance
1	Très probable
2	Bonne probabilité
3	Probabilité moyenne
4	Peu probable
5	Aucune chance

L'attribution d'un niveau se fait à partir de l'examen du plan de contrôle et du programme d'étude.

Le calcul de la criticité donne donc des résultats allant de 1 à 125 maximum.

- **7- Fixation des priorités**

Nous pouvons maintenant faire un graphique de Pareto des différentes causes de défaillances. Selon le principe de ce graphique, un nombre de causes assez limité peut être sélectionné pour obtenir une amélioration très importante de la fiabilité du produit. On peut faire le total des criticités avant et après recherche des solutions pour apprécier le gain. Il ne faut surtout pas fixer *a priori* un niveau de criticité pour sélectionner les causes à traiter !

- **8- Recherches de solutions et mise en application**

Cette recherche doit être bien structurée avec affectation de responsables pour chacun des points à étudier, détermination des objectifs et des délais.

Le tableau AMDEC (*Tableau 12.4*) illustre cette phase de travail.

12.6 AMDEC Projet

Nous allons présenter succinctement le cas d'un « projet » de produit à concevoir avec l'utilisation d'une AMDEC simplifiée. Il s'agit bien du projet qui peut être sujet à défaillances et non plus du produit à concevoir. Une défaillance importante sur un projet peut aller jusqu'à son abandon. Ceci permet de montrer comment on peut adapter la méthode générale et, dans ce cas particulier, en la simplifiant considérablement.

- **Catégories de risque**

Nous proposons une liste de défaillances potentielles (risques) types à titre d'exemple (*Tableau 12.5*). Cette liste se réfère aux domaines clés.

- **Recherche des causes**

Dans un but de simplification à nouveau nous allons ne considérer les causes qu'en les identifiant par catégorie qui résument la majeure partie des causes de défaillances possibles concernant le projet :

– les moyens : équipements, matériels, locaux ;

– le personnel : compétences, formation, habilitation ;

Tableau 12.4 Exemple d'AMDEC Produit (partie I)

Fonction : ouverture et fermeture du tiroir

Défaillance	Causes	Effet	Plan de Surveillance	Notes				Actions		Délai	Résultats Notes			
				D	O	S	C	Nature	Respons.		D'	O'	S	C'
Ressort brisé	Corrosion	Ne s'ouvre pas lors de la commande	Test d'endurance ouvert./ferm. prévu sur 10 tiroirs en accéléré (simulation de 10 ans de fonctionnement)	1	3	5	15				1	1	5	5
	Fatigue du matériau		Calcul de résistance à la fatigue demandé au fournisseur	1	4	5	20				1	2	5	10
Jeu excessif du roulement	Usure	Ouverture bruyante	Test d'endurance ouvert./fermet.	1	2	2	4				1	2	2	4
	Lubrification insuffisante		Par de contrôle prévu ultérieurement en production	5	3	2	30				2	1	2	4
			Total				**69**							**23**

– les méthodes : procédures, instructions, règles, plans, gammes ;
– les délais : approvisionnements, démissions, disponibilité.

Ce n'est que si la cause est retenue suite au calcul de la criticité qu'une analyse plus fine pourra être réalisée.

Tableau 12.5 Exemple de défaillances « projet »

Domaine	Exemple de défaillances
Qualité	Performance importante non tenue
Technique	Nouvelle technologie non maîtrisée en fin de projet
Logistique	Non-respect du planning de développement
Sécurité	Produit présentant des risques
Industrialisation	Performance du dispositif industriel non atteinte Délai non tenu
Coût	Prix du produit non atteint Budget non respecté
Communication	Échec de communication (entre les différents acteurs), par exemple mauvaise remontée des informations clientèle

● **Calcul de la criticité**

Là encore nous allons simplifier en supprimant la notion de non détectabilité qui n'a pas de sens dans ce contexte. Donc la criticité est calculée par :

$$C = O \times S \text{ (Occurrence} \times \text{Gravité)}$$

Pour le reste la démarche reste identique au cas de l'AMDEC produit.

12.7 Généralisation de l'AMDEC

Nous avons déjà dit que l'AMDEC peut être adaptée à tout type de gestion des risques. Il faut d'abord bien en identifier les caractéristiques principales :

– 1- C'est une méthode préventive. Cela signifie qu'elle doit être lancée le plus tôt possible.

– 2- Elle s'appuie sur une recherche systématique des risques et de leurs causes potentielles. La technique du remue-méninges est bien adaptée à cette recherche.
– 3- À chaque cause est associée une criticité. La criticité permet de fixer **les priorités** sur les causes à étudier. Il s'agit donc d'une méthode classique de critères de choix telle que présentée au paragraphe 2.8. Aux trois critères présentés : D, O, S, il est possible d'ajouter d'autres critères ; par exemple nous pouvons ajouter un critère de « Menace/Opportunité » et un critère de « Force/Faiblesse » qui peuvent avoir un poids dans la recherche des priorités. À noter que nous ne sommes pas dans une approche « zéro défaut ». Nous avions déjà marqué notre intérêt pour une démarche d'amélioration permanente avec fixation de priorités plutôt qu'une démarche zéro défaut qui nous paraît quelque peu illusoire. Seuls les risques relatifs à la sécurité des personnes doivent être pris impérativement.

L'application de ces principes doit permettre à ceux qui sont confrontés à la gestion de risques de mettre au point une AMDEC adaptée à leur sujet.

13

La définition du produit

13.1 Spécifications des produits : l'apport de l'analyse de la valeur

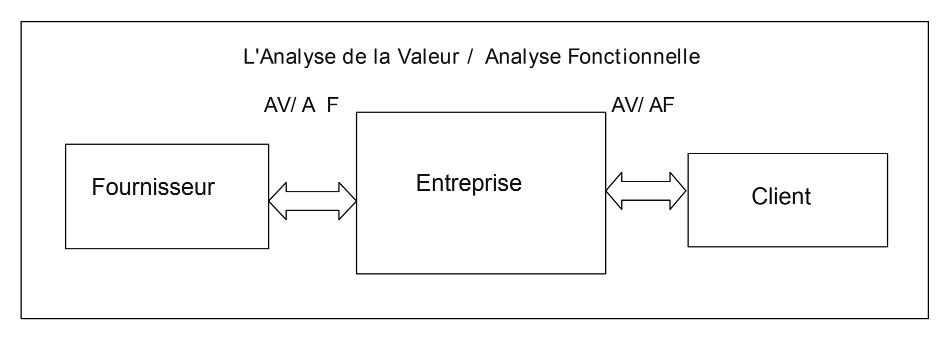
Que ce soit dans l'acte d'achat ou au cours de la conception des produits, nous avons dit l'importance de bien définir les produits à acheter ou à concevoir. À l'achat, c'est le document de base de la relation client-fournisseur. En conception, c'est le document de base dans la relation avec le ou les clients à travers le service Marketing.

L'analyse fonctionnelle et **l'analyse de la valeur** forment un ensemble de méthodes très performant pour aboutir à une spécification des produits prenant en compte d'une façon optimale le besoin du client (les clients de l'entreprise s'il s'agit de la conception, le service achat s'il s'agit des produits à acheter).

L'idéal, mais ce n'est malheureusement que rarement possible, est d'utiliser ces méthodes dans un groupe de travail pluridisciplinaire entre le client et le fournisseur. Le *Tableau 13.1* illustre le positionnement de ces méthodes dans la relation client-fournisseur.

Dans un premier temps, nous allons décrire ces méthodes qui permettent d'aboutir aux spécifications du produit. Dans un deuxième temps, nous examinerons en détail la façon de rédiger ces spécifications.

Tableau 13.1 L'analyse de la valeur et l'analyse fonctionnelle dans la relation client-fournisseur



13.2 But et définitions de l'analyse de la valeur

D'abord donnons quelques définitions officielles.

- **Analyse de la valeur**

> **La norme NF X 50-152 en donne la définition suivante :**
>
> « Méthode de compétitivité organisée et créative visant à la satisfaction des besoins de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception à la fois fonctionnelle, économique, et pluridisciplinaire. »

- **Cahier des charges fonctionnel**

> **La norme NF X 50-151 en donne la définition suivante :**
>
> « Document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en terme de fonctions de service et de contraintes. Pour chacune d'elles sont définis des critères d'appréciation et leurs niveaux. Chacun de ces niveaux est assorti d'une flexibilité. »

Cette définition a le mérite de décrire très précisément la construction du cahier des Charges Fonctionnel.

- **Analyse fonctionnelle**[1]

Pratiquement l'« Analyse de la valeur » englobe l'« Analyse fonctionnelle » qui est la partie essentiellement orientée vers la création du « **Cahier des Charges**

1. Voir également EN 1325 -1.

Fonctionnel ». L'analyse de la valeur apporte une dimension supplémentaire, notamment dans la recherche de solutions économiques.

13.3 Principes de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle

Le principe de l'analyse de la valeur est résumé dans le graphique de la Figure 13.1.

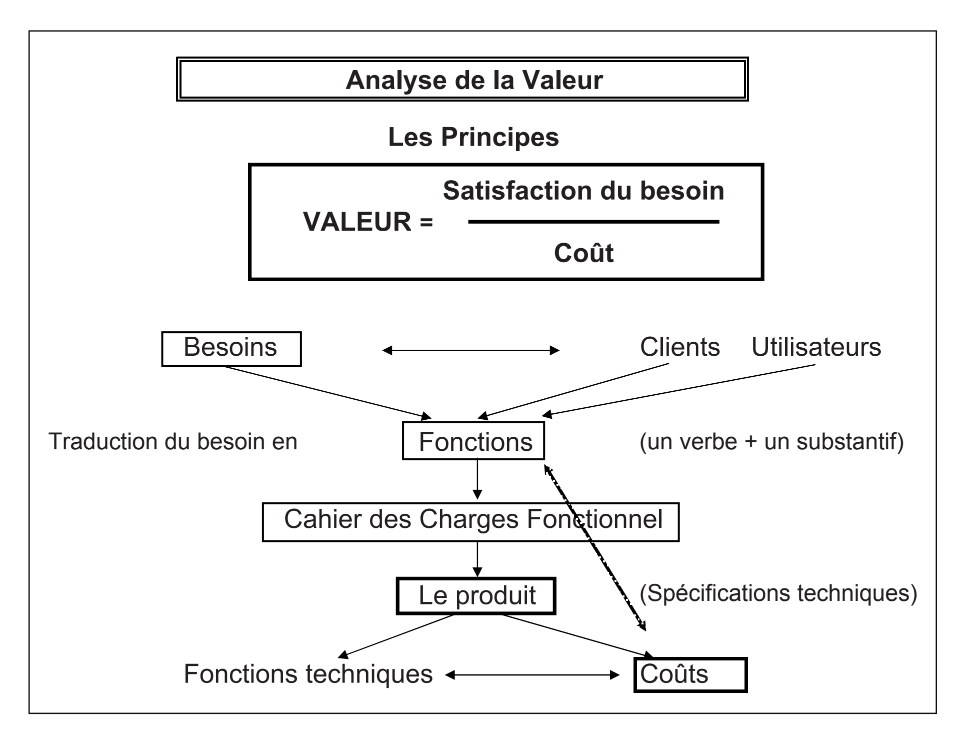


Figure 13.1 Principes de l'analyse de la valeur

● Travail de groupe

L'analyse de la valeur se fait en groupe en réunissant autant que possible des personnes des services suivants : Développement, Méthodes, Achats, Commercial, Chiffrage coûts, Fabrication, Qualité, etc.

Comme nous l'avons dit, l'idéal est de faire l'analyse de la valeur en coopération entre le client et son fournisseur.

● **Notion de valeur**

Cette notion de « **valeur** » est tout à fait spécifique à la méthode. La valeur peut être considérée comme une sorte de rapport entre l'aptitude des fonctions du produit à satisfaire le client « divisée » par le coût des solutions retenues. Nous verrons qu'au final, cela se traduira par donner de la cohérence entre l'importance accordée aux fonctions prises en compte et aux coûts des solutions permettant de les réaliser. On peut faire un rapprochement avec la notion de rapport qualité/prix mais la méthode va très loin dans la rigueur méthodologique permettant de trouver ce rapport.

● **Une méthode très rigoureuse**

L'analyse de la valeur se fait en respectant avec beaucoup de rigueur les étapes suivantes.

13.4 Méthodologie

Elle comprend les étapes suivantes.

13.4.1 L'étude du besoin et son expression

Le produit ou service doit répondre aux besoins du client, lesquels ne peuvent pas toujours être formulés par le client potentiel. Il faut procéder à une étude de marché pour :

– **Déterminer le besoin.** À ce stade, celui-ci s'exprime en termes généraux.
– **Identifier le client et les utilisateurs.** Cette distinction est importante car le client qui est celui qui achète, n'est pas nécessairement l'utilisateur. Dans une entreprise, celui qui utilise un rétroprojecteur ne participe en général pas à l'acte d'achat. Or c'est lui qui manifestera sa satisfaction ou ses insatisfactions.
– **Apprécier le marché** (population, pays, région, catégorie de personnes, etc.). Ces éléments seront indispensables pour évaluer les conditions d'utilisation du produit ainsi que les potentialités du marché en termes de quantités notamment.
– **Déterminer la gamme de produit.** Celle-ci doit être en cohérence avec la politique commerciale de l'entreprise. On ne fait pas du haut de gamme si l'entreprise a traditionnellement une politique de grandes séries à prix réduits.

- déterminer la gamme de prix,
- déterminer le mode de distribution ou vente. Ces éléments interviendront dans la définition du produit. Par exemple, un produit vendu en grande distribution devra avoir un emballage adapté à la présentation dans les rayons des magasins.

– etc.…

Cette première étape est l'occasion de recherche systématique et organisée de toutes les informations disponibles sur le produit envisagé, le marché, la concurrence, etc.

13.4.2 L'analyse fonctionnelle

Le besoin étant déterminé nous rentrons dans l'analyse fonctionnelle qui permettra de réaliser le Cahier des charges fonctionnel...

Cette analyse respecte les étapes suivantes.

● Recenser les fonctions

Il nous faut d'abord identifier toutes les fonctions du produit. Pour cela nous allons procéder avec méthode. Plusieurs méthodes ont été imaginées afin de n'oublier aucune fonction. En pratique, on utilise une des méthodes suivantes ou, plus généralement, une combinaison de certaines :

– 1- Recherche intuitive ;
– 2- Étude du cycle de vie et de l'environnement (Méthode APTE) ;
– 3- Analyse des séquences d'utilisation (SAFE : *Sequential Analysis of Functional Elements*) ;
– 4- Examen des mouvements et des efforts ;
– 5- Analyse d'un produit type ;
– 6- Utilisation des règlements et des normes.

Nous n'allons pas examiner la totalité de ces méthodes pour nous concentrer sur celle qui est très souvent et de plus en plus utilisée : **l'Étude du cycle de vie et de l'Environnement (Méthode APTE[2])**. Sa popularité est telle qu'on lui donne parfois des surnoms tels que « la bête à corne » ou la « pieuvre ».

2. APTE est un nom déposé (APplication aux Techniques d'Entreprise).

Dans un premier temps, on analyse le « **cycle de vie du produit** ». En effet, les fonctions vont devoir répondre à chaque élément du cycle. Prenons l'exemple d'un téléphone fixe. On voit qu'une analyse complète de son cycle de vie représentée dans le Tableau 13.2 peut prendre une ampleur considérable ; aussi il faut être réaliste et utiliser la méthode dans toute sa complexité sur les phases les plus importantes. Pour la ou les phases suivies, il faut rechercher les fonctions et les contraintes.

Nous prenons dans notre exemple la phase d'utilisation normale du produit. On place le produit au centre de la feuille puis on recherche tous les éléments qui constituent son environnement (*Voir le graphique de la Figure 13.1*). Bien sûr, nous n'avons présenté dans notre exemple qu'un nombre limité d'éléments mais ils sont représentatifs des différentes catégories.

Tableau 13.2 Exemple de cycle de vie du produit

Exemple d'un téléphone	
PHASES DU CYCLE DE VIE emballage stockage transport magasinage chez le distributeur transport magasinage chez le détaillant exposition vente livraison déballage installation utilisation maintenance destruction (fin de vie)	**RECHERCHE DES FONCTIONS** ÉTUDE SYSTÉMATIQUE DES CONTRAINTES - normales - exceptionnelles

On recherche systématiquement :

– Les fonctions d'interaction entre un élément, le produit et un autre élément en prenant une à une toutes les relations possibles.

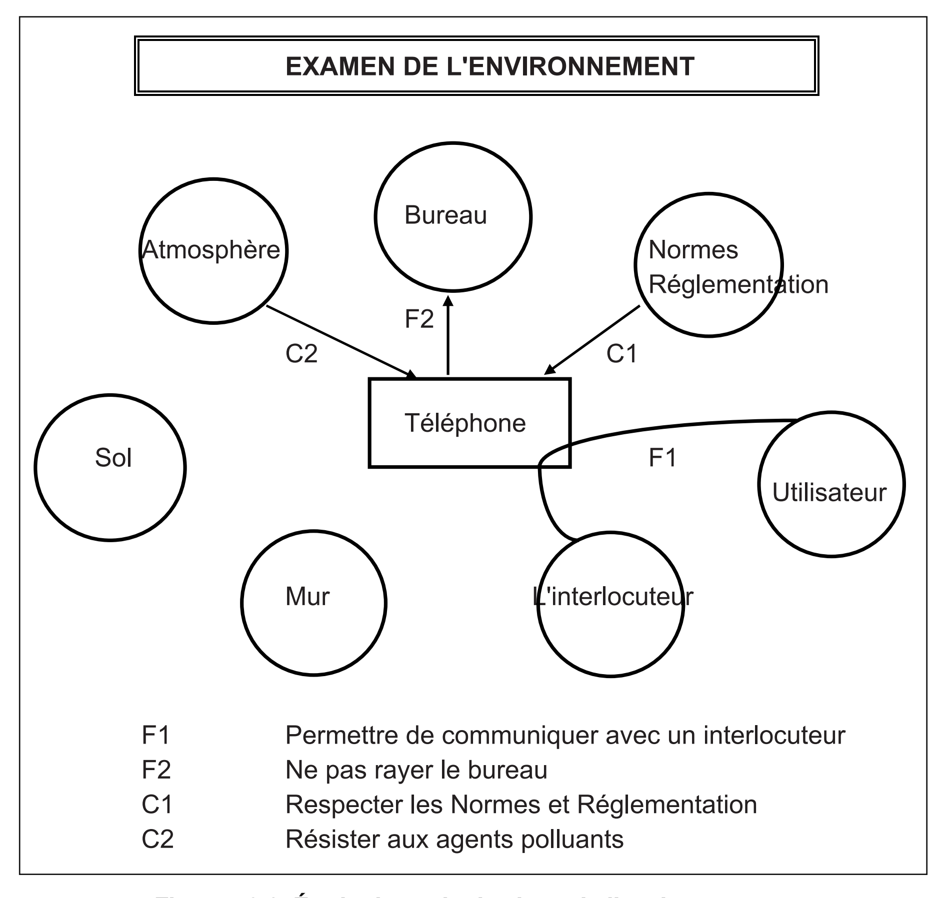


Figure 13.2 Étude du cycle de vie et de l'environnement

Exemple :

$F_{1.1}$: Permettre de communiquer clairement par la voix

$F_{1.2}$: Permettre de communiquer par messages

– Les fonctions d'adaptation du produit par rapport à un élément de l'environnement en les prenant tous un à un.

Exemple :

C_1 : Respecter les normes et réglementations

C_2 : Résister aux agents polluants (éventuels)

– Les fonctions d'adaptation d'un élément de l'environnement par rapport au produit. en les prenant tous un à un.

Exemple :

F_2 : ne pas rayer le bureau

Notre exemple a mis en évidence les deux grandes catégories :

– les fonction d'usage ;
– les fonction de contraintes.

Dans la pratique, on pourra distinguer plus finement :

– les fonctions d'usage : communiquer par la voix ;
– les fonctions d'estime : avoir une ligne moderne ;
– les fonctions complémentaires : être facile à entretenir ;
– les fonctions de contraintes : respecter les normes de transmission ;
– les fonctions techniques : ne pas présenter de points dépassant une certaine température.

Par simplification, nous n'avons donné que quelques fonctions à titre d'exemple mais, en réalité, on trouve de nombreuses fonctions et en principe d'une façon exhaustive.

● **Caractériser les fonctions (Cahier des charges fonctionnel)**

Chaque fonction va être caractérisée par un ou plusieurs critères d'appréciation, conformément au Tableau 13.3 :

Tableau 13.3 Description d'une fonction

LA FONCTION	EXEMPLE DU TÉLÉPHONE
- sa désignation	Puissance sonore
- un critère d'appréciation	Puissance maxi en dB
- un niveau	50 dB
- une flexibilité Tolérance Taux d'échange Classe de flexibilité	 49 à 51 dB 1 euro/dB Non négociable

Le tableau suivant montre, toujours sous une forme très simplifiée, le cahier des charges fonctionnel d'un téléphone fixe sans fil.

Tableau 13.4 Exemple partiel de Cahier des charges fonctionnel d'un téléphone sans fil

N°	Désignation	Critère	Niveau	Tolérance[3]
1	Avoir Puissance sonore suffisante	Puissance maxi en dB Spectre de fréquences	50 dB Selon gabarit joint en annexe	49 à 51dB Voir gabarit
2	Être stable sur une table (partie fixe : base)	Rapport (Hauteur centre de gravité)/ largeur Poids	< 10 % 300 g	290 à 310 g
3	Avoir une faible consommation	Conso sous écoute Conso en attente	< 15 w < 2 w	
4	Avoir une grande autonomie	Temps sans recharge	100 h	90 à 110 g
5	Être facile à manier (partie mobile)	Poids Forme	100 g gabarie	80 à 120 g
6	Être fiable	λ (taux de défaillances) Durée de vie utile	> 10-5 déf/h 10 ans	
7	Être résistant aux chocs et manipulations	Test de chocs Test de vibrations	Selon normes	fonctionnement normal après test

Si nécessaire, il faut préciser :

– les méthodes de mesure pour une caractéristique mesurable ;

– les méthodes d'observation pour les défauts d'aspects ;

– les conditions de fonctionnement pour la fiabilité.

Comme on le verra au paragraphe 13.6.

3. Par souci de simplification nous avons limité la notion de flexibilité quelque peu complexe à celle de tolérance.

● **Hiérarchiser les fonctions**

En fonction du métier, on se crée une grille donnant les différentes classes de fonction, relativement à leur importance pour le client ou l'utilisateur.

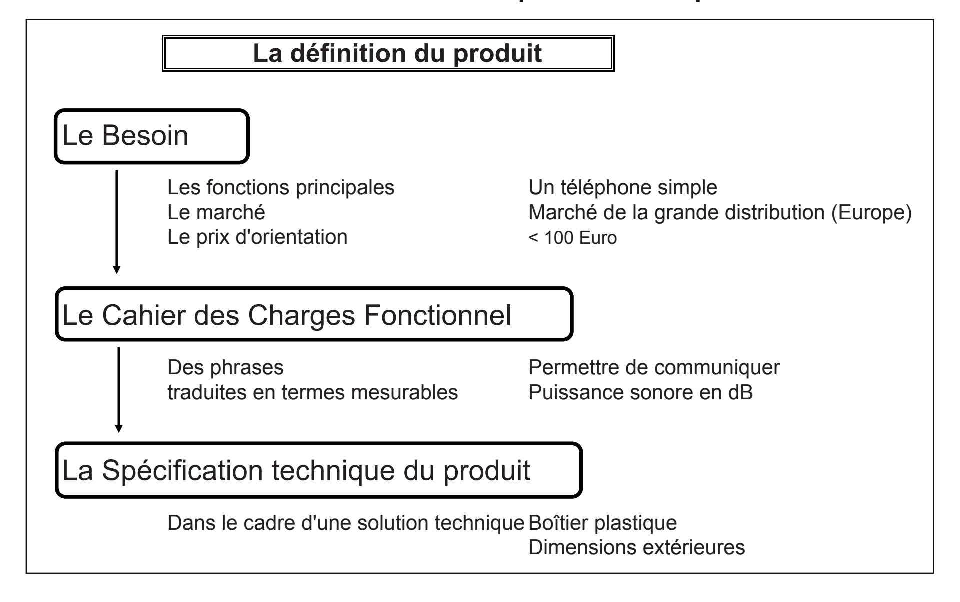
Par exemple :

- 1 : utile
- 2 : nécessaire
- 3 : importance
- 4 : très importante
- 5 : vitale

13.4.3 La recherche des solutions et les spécifications du produit

À partir du cahier des charges fonctionnel, les techniciens vont se mettre au travail pour trouver les solutions techniques permettant autant que possible de respecter les fonctions ainsi définies. L'analyse de la valeur propose tout un ensemble de méthodes permettant notamment en groupe de travail de faciliter la découverte des solutions économiques souvent innovantes. Nous n'aborderons pas ce sujet ici. Signalons cependant que le « *brainstorming* » est largement employé dans ce contexte.

Tableau 13.5 Du besoin à la spécification du produit



Finalement, nous avons progressé rationnellement du besoin au « Cahier des charges fonctionnel » pour aboutir aux « spécifications du produit », conformément au Tableau 13.5, alors que bien souvent, la tendance est de décrire dès le départ ces spécifications, au risque de s'enfermer dans des solutions de produits inutilement chers et ne répondant pas très bien aux besoins.

13.4.4 La valorisation des fonctions

Maintenant que nous avons imaginé les solutions, nous allons valoriser les fonctions. Cela se fait en établissant un tableau dont le principe est décrit dans le Tableau 13.6.

On s'efforce d'attribuer la part du coût des composants et du procédé de fabrication qui peut être attribuée à chaque fonction. L'expérience montre que ceci ne présente pas de difficultés majeures même si l'on n'échappe pas à un certain arbitraire.

On se souvient que l'on avait attribué à chaque fonction un poids (*voir le paragraphe sur la hiérarchisation*). Cela permet de faire la relation entre le poids de chaque fonction et son coût. Ce qui permet de mettre en évidence :

- des fonctions trop chères compte tenu de leur faible poids ce qui peut entraîner des négociations pour remettre en cause le bien fondé d'une fonction ou en réduire le niveau ;
- les fonctions les plus chères sur lesquelles une recherche de réduction de prix doit être entreprise.

Tableau 13.6 Tableau de valorisation des fonctions

Fonctions	Poids	Composants			Procédé de fabrication		Coût de la fonction
		1	2	3	1	2	
A	5			15	9		**24**
B	2	3				28	**31**
C	3		6		2		**8**
D	2	7			5		**12**
E	1		20			5	**25**
Coûts		**10**	**26**	**15**	**16**	**33**	**100**

13.5 Commentaires sur l'analyse de la valeur et l'analyse fonctionnelle

Sans remettre en cause le bien fondé de cette démarche nous attirons l'attention sur deux points.

13.5.1 L'impact sur la sûreté de fonctionnement

L'analyse de la valeur aboutit souvent à des solutions techniques très innovantes, ce qui est en soi plutôt une bonne chose, mais elles exigent le un travail important sur le plan qualité pour s'assurer que la solution ne présente pas de risque sur le plan de la sûreté de fonctionnement. Ce qui implique des coûts et des délais pas toujours facile à prévoir et à maîtriser.

13.5.2 La prise en compte du comportement des clients

L'analyse fonctionnelle est une démarche qui est orientée vers l'aspect utile des fonctions. Cependant, le client peut être sensible à des fonctions accessoires, pas très utiles en elles-mêmes, mais qui font vendre. Il faut donc compléter l'analyse d'une réflexion sur ce sujet et examiner ce que propose la concurrence.

13.6 Rédactions des spécifications du produit

13.6.1 La description du produit (la spécification[4])

Nous nous intéressons aussi bien à un produit acheté qu'à un produit à concevoir par l'entreprise. Dans le cas du produit acheté, il s'agit, bien entendu, du cas d'un produit qui sera conçu par le fournisseur pour un besoin « spécifique ».

Nous prendrons systématiquement comme exemple le cas d'un rétroprojecteur qui serait conçu et produit en fonction des demandes d'un client.

Nous avons vu que l'idéal est que la spécification du produit soit l'aboutissement d'une analyse de la valeur. Les spécifications des produits doivent inclure autant que possible les éléments suivants.

4. Nous évitons d'utiliser l'expression « Cahier de charges » car sa définition quelque peu ambiguë intègre souvent selon les personnes d'autres éléments qui ne relèvent pas de la définition proprement dite du produit. Les normes ISO ne connaissent que le mot « exigences relatives aux produits », nous employons le terme « spécifications du produit » qui correspond bien au concept général de « définition du produit ».

13.6.2 La description des caractéristiques initiales du produit (ou 0 heure)

Cela concerne les caractéristiques du produit au moment du début de son utilisation, par opposition à son comportement dans le temps qui relève de la fiabilité.

● Caractéristiques mesurables et plage de tolérance

Il faut associer à chaque caractéristique une plage de tolérance.

Exemple : Le flux lumineux d'un rétroprojecteur doit être de :
- Valeur nominale (la plus souhaitable) : 500 Lumens
- Plage de tolérance : 450 à 550 Lumens.

La difficulté principale est la validité de cette plage de tolérance Peut-être que 400 à 500 serait suffisant ? Or, force est de constater que dans la pratique, ces plages de tolérance sont indiquées de façon subjective sans véritable vérification de la nécessité fonctionnelle. Le surcoût que cela entraîne sur le prix de revient du produit peut en être affecté d'une façon importante.

● Caractéristiques par attribut et leur limite acceptable

Il s'agit de caractéristique appréciée d'après un jugement par « Bon » ou « Mauvais ».

Exemple : La surface ne doit pas avoir de craquelure.

Se pose le problème d'une limite, cela peut se faire avec des modèles, des photos, etc.

Là encore, la validité de ces limites est sujette à caution. Combien de fois des exigences n'ont aucune justification…

Par exemple, on voit des exigences sur des états de surface qui doivent être parfaits pour des raisons esthétiques alors que le produit ne sera pas visible dans son application.

● Méthodes de mesure des caractéristiques

La valeur d'une caractéristique peut n'avoir de sens qu'en fonction du dispositif de mesure. Par exemple, la spécification d'un niveau de bruit n'a vraiment de sens qu'en indiquant comment il sera mesuré. Il existe des normes sur ce sujet. Chaque fois que cela se présente, il faut définir cette méthode. S'il s'agit d'une caractéristique par attribut, il peut être nécessaire de préciser les conditions d'appréciation et d'observation.

Exemple : absence de tache visible à la loupe grossissement 10 sous un éclairage bien défini.

La difficulté est de trouver le compromis entre la nécessité de bien définir les méthodes de mesure et d'observation alors que les règles de l'art pourraient s'avérer suffisantes. Mais notre constat est plutôt d'identifier une insuffisance dans ce domaine.

Ce sujet crée une confusion avec la notion de contrôle. Les méthodes de mesure et d'observation sont exprimées uniquement dans le but d'éviter toute ambiguïté sur la spécification du produit. Bien sûr, ces méthodes seront en général celles utilisées pour réaliser un éventuel contrôle. Mais encore une fois, les plans de contrôle doivent être traités à part dans d'autres documents.

● Importance des caractéristiques

Il peut être souhaitable d'associer aux caractéristiques spécifiées un niveau d'importance ou de gravité.

Par exemple, pour notre rétroprojecteur, on pourrait considérer les caractéristiques directement liées à la qualité de l'image projetée et au niveau de bruit comme « Majeur » et marquer d'un signe particulier celles qui pourraient avoir une influence sur la sécurité (il n'y a pas de langage normalisé pour ce type de caractérisation).

● Taux de défauts acceptables

Lorsque le produit concerné relève d'une production en grande série il est souhaitable de fixer un niveau limite de non conformes.

Il peut paraître choquant de tolérer des non conformes dans un lot. Ce sujet est assez polémique ! Il est de bon ton de dire que le but visé est « zéro défaut », mais cette notion nous paraît peu constructive. Il y a toujours des non conformes, mais à des taux qui doivent être très bas et qui sont effectivement très bas dans la pratique. Seules les caractéristiques relevant de la sécurité des personnes ne peuvent se voir attribuer une tolérance de non conforme pour des raisons évidentes.

La tendance est depuis de très nombreuses années de fixer des taux exprimés non plus en pourcentages mais en ppm (partie par millions) exprimant par là l'exigence de taux très bas.

Par exemple, un taux de 100 ppm correspond à 0,01 % de non conformes.[5]

---

5. Une question de principe se pose : quelle est la différence avec ce que l'on appelle le NQA (Niveau de Qualité Acceptable) que l'on utilise pour déterminer les contrôles par échantillonnage éventuels ?

En tout état de cause, fixer un niveau de ppm n'autorise en aucun cas la production de non conformes, il ne s'agit que d'une tolérance.

Le niveau de ppm peut être associé à une catégorie de défauts par exemple l'ensemble des défauts dits « Majeurs ».

- **Indice de capabilité**

On peut, pour des caractéristiques mesurables importantes, définir un niveau limite sous forme d'un « indice de capabilité » Cpk. Lorsqu'une caractéristique est supposée en production respecter une distribution conforme à la loi de Gauss, plutôt que de définir un niveau de ppm pour cette caractéristique, il est pratique d'utiliser l'indice de capabilité qui indique l'aptitude du produit à respecter un certain taux de ppm. L'estimation de cet indice a le mérite de ne nécessiter qu'un nombre relativement réduit de produits.[6] Nous avons examiné cette notion de capabilité dans le chapitre sur la Maîtrise statistique des procédés (en anglais : *Statistical Process Control*).

13.6.3 Les exigences relatives à la sûreté de fonctionnement

Nous avons développé ce sujet dans un chapitre spécifique auquel on pourra se reporter pour un rappel des définitions notamment.

La sûreté de fonctionnement recouvre les domaines suivants.

- **La fiabilité**

Il s'agit de l'aptitude à la non-défaillance du produit en cours de fonctionnement ou d'utilisation. C'est le point le plus difficile à déterminer. Mais nous sommes toujours surpris de voir ce point non traité alors que le comportement du produit dans le temps est essentiel. Une des raisons est la difficulté qu'il y aurait à les vérifier. Cela est certes un vrai problème, mais ce n'est pas parce que leur vérification est difficile voire impossible qu'il ne faut pas exprimer

---

Rappelons la définition : Le NQA tel que défini dans la norme ISO 2859-1 est le « niveau de qualité qui, pour le contrôle par échantillonnage, constitue la limite pour une moyenne de processus satisfaisante ». Cette norme permet l'établissement des plans de contrôle par échantillonnage.
Dans notre esprit il n'y en a pas de différence entre le niveau spécifié de ppm et le NQA si ce n'est que les % des NQA que l'on trouve dans les tables de contrôle restent à des niveaux de valeur assez élevés car des niveaux très petits entraîneraient des quantités de produits à prélever pour le contrôle rédhibitoires.

6. Nous nous limitons à indiquer quelques équivalences : *Cpk* = 1 : 1350 ppm ; *Cpk* = 1,33 : 32 ppm ; *Cpk* = 1,5 : 3,4 ppm.

le besoin. Un fabricant compétent saura traduire ces exigences en termes de conception du produit, choix des composants, méthode de fabrication, etc.

Nous résumons son élaboration dans le Tableau 13.7.

Conditions d'utilisation

Le premier point à traiter est l'analyse des **conditions d'utilisation**. Cela peut nécessiter une analyse statistique poussée en clientèle. On distingue :

– les contraintes dues à l'utilisateur : la vitesse d'utilisation d'un véhicule, le nombre de cycles d'utilisation d'un appareil, etc. La solution est alors de définir des conditions maximales d'utilisation ;

– pour des produits complexes, on emploie la notion de mission et de « profil de mission » qui consiste à décrire les contraintes et l'utilisation du produit pendant les différentes phases de sa mission ;

– les contraintes dues à l'environnement, au stockage et au transport : climat, conditions de vibrations, chocs, etc., qui sont des données essentiellement variables. La solution utilisée habituellement est de définir des conditions types, artificielles, sous forme d'essais climatiques et mécaniques définis dans des normes. On peut également identifier des contraintes chimiques, par exemple lorsque le produit risque de se trouver dans une atmosphère polluée.

Tableau 13.7 Structure des spécifications de la fiabilité

Type de défaillances	Conditions d'utilisation	Indicateurs statistiques	Définition des défauts
Défaillances complètes et soudaines	Température Tension d'alimentation Puissance Contraintes mécaniques, physique, chimiques etc.	λ, MTBF Durée de vie utile…	Tolérances Défauts limites etc.
Défaillances par dérive		Vie Utile Variation tolérée de moyenne,	
Essais mécaniques et climatiques (environnement)	Nature de l'essai et sévérité		

Ces essais environnementaux font l'objet de normes très nombreuses et très expérimentées.

Citons quelques normes :

- NF ISO 14050 : Management environnemental - Vocabulaire
- NF C 20-7xx (CEI 68-2) : Essais fondamentaux climatiques et de robustesse mécanique - méthodes d'essais
- UTE C20-470 : Méthodes d'essais – Essais généraux climatiques et mécaniques – une approche des problèmes posés par les essais accélérés en atmosphère corrosive
- UTE C20 – 419 : Méthodes d'essais – Essais généraux climatiques et mécaniques – guide pour l'essai composite-climatique – information de base
- CEI 60068-2 : *Série de normes sur les Essais fondamentaux climatiques et de robustesse mécanique - méthodes d'essais*

Concernant ces essais, nous sommes en présence d'un cas un peu particulier. D'abord, qui dit essai dit (ou fait penser à) contrôle. Or, ce n'est pas notre sujet. Mais force est de constater que définir l'aptitude à résister à des conditions climatiques par exemple est très difficile ; la solution adoptée est de prescrire dans la spécification **l'aptitude du produit à résister à ces essais**.

La difficulté se résume à savoir choisir le bon niveau d'exigences.

Indicateurs statistiques

Ensuite, il nous faut définir le niveau pour les indicateurs statistiques les mieux adapté au type de produit concerné (réparables ou non réparables, produit à risque d'usure ou non par exemple…).

Rappelons les principaux indicateurs :

- **Le taux de défaillances λ.** Il s'agit de la proportion moyenne de défaillances par produit et par unité de temps[7] pour une période donnée. Il est adapté aussi bien aux produits réparables que non réparables ; λ étant le plus souvent variable dans le temps cet indicateur est bien adapté au cas où il est assez constant ce qui est assez général pour les produits électroniques.

7. Par exemple si N produits identiques ont k défaillances pendant un temps T : $\lambda = k/NT$, cet indicateur est bien adapté aux produits peu sensibles au vieillissement ce qui est le cas en général des composants et appareils électroniques.

- **La MTBF**[8] qui n'a de sens que pour les produits réparables. Elle doit être définie pour une période donnée car elle est en général non constante dans le temps. À noter que : $\text{MTBF} = \frac{1}{\overline{\lambda(t)}}$ $\overline{\lambda(t)}$ étant la valeur moyenne de λ sur la période considérée.
- **La Fiabilité ou Taux de survie.** En général noté R (correspondant au terme anglais : *Reliability*), il s'agit de la proportion de produits encore en vie après un temps de fonctionnement donné.
- **La durée de vie moyenne.** Cet indicateur est bien adapté aux produits qui ont tendance à mourir dans une plage de temps assez court. Un exemple typique est la lampe d'éclairage classique au tungstène.

Exemple d'une spécification de la fiabilité d'un rétroprojecteur :

- *R* (Taux de survie) : 90 % de produits encore en vie au bout de 10 ans.
- λ < 10 – 5 défaillances par heure en moyenne (cela correspond à une MTBF de 100.000 heures)
- Durée de vie moyenne de l'ampoule > 500 heures
- Les conditions d'utilisation sont : En moyenne de 2 heures par jour, dans une ambiance de bureau (température inférieure à 25 degrés et humidité moyenne de 70 %).
- Test climatique : Essai d'environnement NF EN 60068-2-30 (chaleur humide).

● Spécification de la maintenabilité

Il suffit de fixer des limites ou de définir des conditions de maintenance acceptable par exemple.

Il s'agit de l'aptitude à la réparation et à l'entretien. Les indicateurs classiques sont :

Indicateur	Exemple
TMR (Temps Moyen de Réparation) auquel il est bon d'associer une limite de coût	< 3 heures Taux horaire < 50 Euros
TMRS (Temps Moyen avant Remise en Service)	< 1 jour

8. « Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement » est une traduction approximative de la vraie définition en anglais *Mean Time Between Failure*.

Il peut être nécessaire de définir des éléments tels que la simplicité de réparation ou la maintenance, ce qui peut se traduire par des durées et des coûts limites et la mise à disposition de composants pour réparation pour le SAV.

S'il s'agit d'un produit bien connu, on pourra définir des conditions telles que :

– Réparation de niveau 1 (sur site) ne nécessitant pas de matériel de soudure ;
– Accès facile pour changer une pièce (temps < 1 minute).

Il peut être nécessaire de déterminer les stocks de pièces détachées à prévoir et le mode de gestion de ces stocks.

● **Spécification de la disponibilité**

Le taux de disponibilité souhaitable par le client ne pose pas de difficultés majeures à déterminer. Le taux devra être d'autant meilleur que les conséquences d'une indisponibilité sont importantes. Par exemple, la panne d'un véhicule peut être moins grave que celle d'un réseau informatique.

Il s'agit de l'aptitude à l'emploi. Sa valeur dépend de la fiabilité et de la maintenabilité mais est très intéressante à définir pour des équipements de production notamment. On peut par exemple spécifier pour une machine une disponibilité de 99 % du temps. On peut spécifier différents taux. Par exemple, le taux peut intégrer ou non les temps de maintenance pour ne prendre en compte que les temps de réparation, etc.

● **Sécurité**

Il s'agit de l'aptitude du produit à la non-agression des individus et de l'environnement.

● **Invulnérabilité**

Il s'agit de l'aptitude à résister aux agressions.

● **Prestations associées**

Les services associés peuvent être :

– une formation à l'utilisation du produit ;
– une prestation de service après vente ;
– une aide à l'entretien du produit ;

– un mode d'emploi ;
– etc.

13.6.4 Les commentaires sur les spécifications du produit

Nous avons vu que les spécifications peuvent être très élaborées. Il ne faut pas tomber dans l'excès. Le problème est de trouver un point d'équilibre entre un excès de complexité notamment sur des produits simples et des insuffisances qui risquent de se traduire par un produit conforme au contrat mais pas au besoin du client. Il faut être réaliste mais, à nouveau, nous insistons sur les lacunes fréquentes dans le domaine de la fiabilité.

Conclusion

Nous espérons que cette présentation de l'ensemble de ces techniques ou méthodes aura contribué à montrer qu'elles forment le complément indispensable au management de la qualité, que ce soit en adoptant un système de management de type ISO 9000 ou qualité totale. Nous pensons que la plupart, outre leur intérêt pour améliorer la qualité des produits et la productivité de l'entreprise, répondent directement à la façon de satisfaire les exigences de la norme ISO 9001:2008. Nous avons bien conscience que chaque entreprise a ses spécificités et que certaines méthodes ou techniques présentées peuvent ne pas présenter d'intérêt pour certaines d'entre elles ou méritent une adaptation. Mais notre expérience nous fait penser que nous avons sélectionné celles qui sont d'un emploi le plus courant.

Nous avons voulu mettre en valeur quelques idées clés :

– Ces méthodes ou techniques ne nécessitent pas systématiquement des experts spécialisés et la présentation qui en est faite dans ce livre peut suffire à « attaquer » d'une façon autonome la plupart d'entre elles. L'important est d'abord d'identifier quelles méthodes ou quelles techniques sont adaptées aux besoins spécifiques de chaque secteur de l'entreprise. Alors il sera peut-être nécessaire d'approfondir ces notions méthodologiques à l'aide d'ouvrages spécialisés, d'un expert ou d'une formation spécifique et éventuellement de les adapter au cadre de l'entreprise.

– Elles impliquent toutes pour atteindre leur pleine efficacité :
  - de suivre avec rigueur une méthodologie structurée telle que celles présentées,
  - de les appliquer en travail en groupe, ce qui a un double mérite : impliquer le personnel dans les démarches qualité et profiter de la richesse de la confrontation des idées,
  - d'avoir un support du management d'autant plus fort que certaines doivent, par leur importance, être gérées comme un véritable projet d'entreprise avec tout ce que cela implique sur le plan de la gestion.

Bibliographie

Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi, Maurice Pillet, Éditions d'Organisation université, 1994.

L'entreprise du 3e type, Archier et Sérieyx, Seuil, 1984.

Le zéro mépris, Sérieyx, Dunod, 1999.

La nouvelle excellence, Sérieyx, Maxima, 2000.

La qualité totale dans l'entreprise, Gilbert Stora et Jean Montaigne, Éditions d'Organisation, 2000.

Gestion de la qualité, Dr J.M. Juran, AFNOR Éditions, 1983.

Réussir la qualité totale, Michel Périgord, Éditions d'Organisation, 1998.

Bibliographie Qualité

AFNOR Éditions

Nous vous proposons ici une bibliographie recensant les publications de AFNOR Éditions dans le secteur de la qualité, classées ainsi :

- ouvrages ;
- recueils de normes ;
- classeur avec mises à jour ;
- site thématique.

Pour trouver l'intégralité de nos titres, rendez-vous sur :
http://www.boutique-livres.afnor.org

Ouvrages

Bellaïche M., *Manager vraiment par la qualité*, 2008.

Bellaïche M., *L'après certification ISO 9001*, 100 questions pour comprendre et agir, 2004.

Bellaïche M., *Les exigences de management de l'ISO 9001*, Mémentos « A Savoir », 2001.

Bellut S., *Les processus de la conception. ISO 9000 et performance*, 2004.

Boucher F., Croguennec B., *Comprendre ISO 9001:2008*, 2009.

Boutou O., Landy G. Saintovin B., *Performance de l'entreprise*, 100 questions pour comprendre et agir, 2006.

Brulebois C., Perrenot G., Saintvoirin B., *6 Sigma. Le guide !*, 2009.

Cattan M., *Pour une certification qualité gagnante. Premiers pas vers la qualité totale*, 2009.

Cattan M., *Guide des processus. Passons à la pratique !*, 2008.

Cattan M., P*our une certification qualité gagnante. Avant – Pendant – Après*, 2003.

Cerkevic C., *Les référentiels d'Excellence*, Mémentos « A Savoir », 2002.

Feujo I., *Guide des audits. Quelles synergies gagnantes pour l'entreprise ?*, 2004.

Frécher D., Ségot J., Tuzzolino P., *Mise en place d'une démarche qualité*, 100 questions pour comprendre et agir, 2004.

Frécher D., Ségot J., Tuzzolino P., *Les processus*, 100 questions pour comprendre et agir, 2003.

Freyssinet M., Perez J.-J., *13 étapes pour réussir votre certification*, 2007.

Froman B., *Du manuel qualité au management de management. L'outil stratégique*, 2007.

Iribarne P., Verdoux S., *L'autoévaluation des performances à travers le modèle EFQM. Guide de terrain pour réussir*, 2005.

Iribarne P., Verdoux S., *Prix, modèle & démarches EFQM. Guide de terrain pour réussir*, 2005.

Joing J.-L., *Auditer l'éthique et la qualité. Pour un développement durable*, 2009.

Jonquières M., *Manuel de l'audit des systèmes de management. À l'usage des auditeurs et des audités*, 2006.

Krebs G., Mougin Y., *Les nouvelles pratiques de l'audit qualité interne*, 2007.

Krebs G., *La relation auditeur-audité, 100 questions pour comprendre et agir*, 2009.

Lamprecht J., *Démystifier Six Sigma. Comment améliorer vos processus*, 2006.

Landy G. AMDEC. *Guide pratique*, 2007.

Madoz J.-P., *L'amélioration continue*, 100 questions pour comprendre et agir, 2005.

Madoz J.-P., L'audit et les projets, 100 questions pour comprendre et agir, 2003.

Maréchal C., *L'énigme du processus*, 2003.

Maréchal C., *Autoévaluation qualité*, Mémentos « A Savoir », 2003.

Mathieu S., *Comprendre les normes ISO 9000 version 2000*, 2002.

Mathieu S., *Les référentiels de progrès*, 100 questions pour comprendre et agir, 2007.

Mitonneau H., *Réussir l'audit des processus. Un nouveau référentiel pour une nouvelle vision de l'audit*, 2006.

Mitonneau H., *L'auditeur qui en savait trop…,* 2009.

Mongillon P., Verdoux (S.), *L'entreprise orientée processus. Aligner le pilotage opérationnel sur la stratégie et les clients*, 2008.

Mougin Y., *Les nouvelles pratiques de l'audit de management QSEDD. Qualité, santé et sécurité, environnement, performance et développement durable*, 2008.

Mougin Y., *Manager durablement dans l'efficacité*, 2007.

Mougin Y., *La qualité, c'est facile : j'en fais tous les jours !. Se former à l'ISO 9001*, 2007.

Mougin Y., *La performance ? Soyez tranquille, je la surveille de près !*, 2007.

Mougin Y., *Quel avenir pour les responsables qualité ? Savoir rebondir*, 2005.

Pascart E., *Six sigma. La force du changement en période de crise !*, 2009.

Pinet C., *10 clés pour réussir sa certification ISO 9001:2008*, 2009.

Pinet C., *10 clés pour réussir sa certification QSE*, 2009.

Saulou J.-Y., *Tableaux de bord pour décideurs qualité*, 2006.

Sébilo D., Vertighem C., *De la qualité à l'assurance de la qualité. Accompagner la démarche*, 2007.

Weill M., *L'audit stratégique. Qualité et efficacité des organisations*, 2007.

Recueils de normes

Les clés de la certification et de l'accréditation (CD-ROM), 2008.

Démarches qualité dans les organismes de recherche. Normes et outils, 2005.

Gestion documentaire en qualité, 2007.

Des guides pour réussir l'ISO 9001 !. Les fascicules de documentation et les accords publiés par AFNOR, 2009.

Les ISO 9000:2008. Nouvelle étape ! NF EN ISO 9001, DIS 9004 ce qui va changer, 2e édition, 2009.

Les normes ISO 9000 pour accompagner l'ISO 9001. Assurer un SMQ au sein d'une économie mondiale, 2009.

Manuel ISO 9000 pour les PME-PMI. Accompagnement des entreprises, 2009.

Mesure et amélioration de la qualité, 2004.

Qualité 2008. Vers un management global !, 2009.

Classeur avec mises à jour

Kit prêt à l'emploi. Les outils du responsable qualité, environnement, sécurité et développement durable.

Site thématique

http://www.qualite.afnor.org